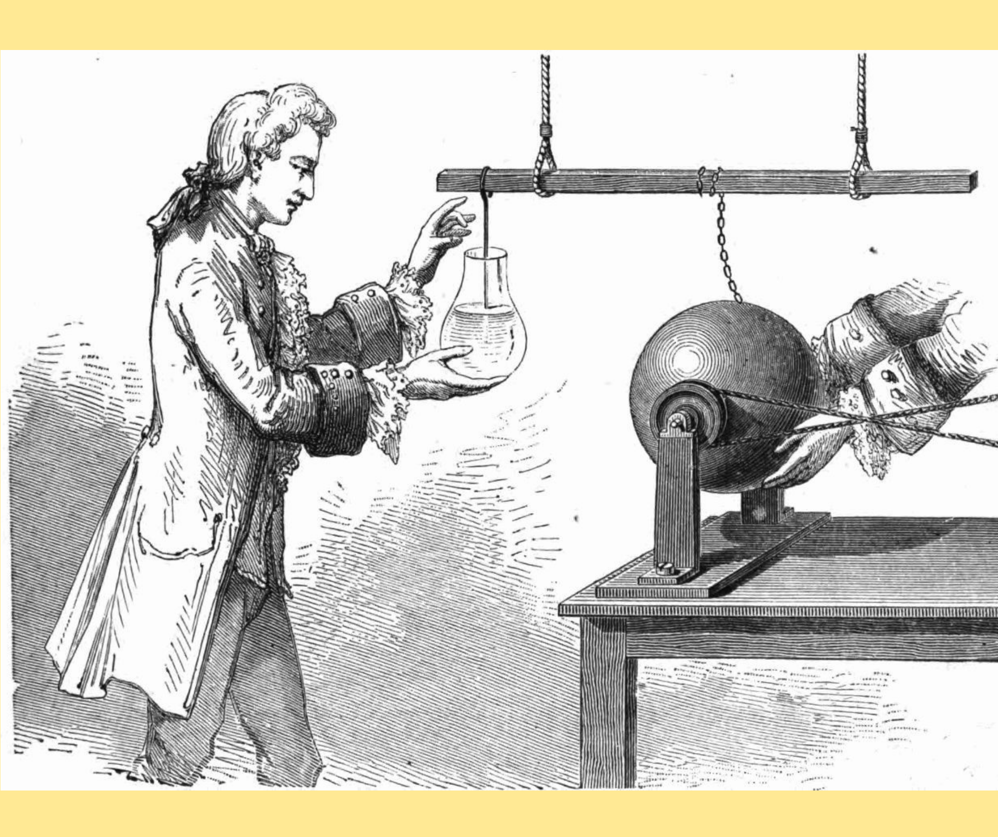
АНДРЕ КОЧ ТОРРЕС АССИС



Экспериментальные и Исторические Основы Электричества

Том 2

Перевел с английского Артур Бараов

Экспериментальные и Исторические Основы Электричества

Том 2

АНДРЕ КОЧ ТОРРЕС АССИС
Перевел с английского Артур Бараов



Published by C. Roy Keys Inc.
4405, rue St-Dominique
Montreal, Quebec H2W 2B2 Canada
http://redshift.vif.com

First Published 2019

Library and Archives Canada Cataloguing in Publication

Title: Ėksperimentalʹnye i istoricheskie osnovy ėlektrichestva / Andre Koch Torres Assis ; russkiĭ perevod, Artur Baraov.
Other titles: Experimental and historical foundations of electricity. Russian
Names: Assis, André Koch Torres, 1962- author. | Baraov, Artur, 1957- translator.
Description: Translation of: The experimental and historical foundations of electricity. | Includes bibliographical references. | Contents: Tom 2
Identifiers: Canadiana (print) 20159029988 | Canadiana (ebook) 20159029996 | ISBN 9781987980196 (v. 2 ; softcover) | ISBN 9781987980202 (v. 2 ; PDF)
Subjects: LCSH: Electricity—Experiments. | LCSH: Electricity—History.
Classification: LCC QC533 .A8817 2015 | DDC 537.078—dc23

Передняя обложка: Одна из первых иллюстраций эксперимента с лейденской банкой (1745).
Источник: А. П. Дешанель, *Элементарный трактат по натуральной философии*. Д. Эпплтон и К, Нью-Йорк, 1876. Часть 3, с. 570, Рисунок 382. Перевод Дж. Д. Эверетта.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ИСТОРИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Том 2

АНДРЕ КОЧ ТОРРЕС АССИС

Институт физики
Университет Кампинас—UNICAMP
13083-859 Кампинас, Бразилия

Электронная почта: assis@ifi.unicamp.br

Домашняя страничка: www.ifi.unicamp.br/~assis

Перевел на русский Артур Бараов
Электронная почта: arthur.baraov@gmail.com

Оглавление

Презентация и благодарности

Это русский перевод Артура Бараова[1] второго тома книги *The Experimental and Historical Foundations of Electricity*.[2]

Мы воспроизводим здесь с некоторыми изменениями Презентацию, представленную в томе 1 этой работы.[3]

В начале 1990-х я открыл для себя работу Норберто Кардосо Феррейра из Института Физики при Университете Сан-Паулу (УСП), Бразилия. Одним из его научных интересов было экспериментально продемонстрировать самые важные аспекты электричества с помощью очень простых и легко доступных материалов. У меня была возможность посетить его в УСП в 1993 году. Во время этого визита он дал мне небольшой набор экспериментальных материалов из тонкого картона, пластиковых соломок, папиросной бумаги, скрепок и т.п. Он показал мне, как выполнять основные эксперименты, а также свою книгу *Plus et Moins: Les Charges Électriques*.[4] Меня захватило то, что я узнал, понимая, как можно было экспериментально представить очень глубокие физические явления с помощью легко доступных материалов. Я хранил этот материал как сокровище в течение 10 лет, но не использовал и не работал с ним в течение этого периода. Я очень благодарен Норберто Феррейра за все то, что я узнал от него. Недавно я обнаружил другие произведения Феррейра, как всегда чрезвычайно богатые и творческие.[5] Много интересного я почерпнул и из бесед с его учениками Rui Manoel de Bastos Vieira и Emerson Izidoro dos Santos.

В 2005 году я встретил Альберто Гаспара и обнаружил его книгу *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental*.[6] Из книги и других его произведений я также узнал много нового.[7]

С 2004 по 2007 я преподавал на курсах повышения квалификации учителей средней школы в рамках проекта *Teia do Saber* министерства обра-

---

[1]Электронная почта: arthur.baraov@gmail.com
[2][Ass18a] и [Ass18b].
[3][Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].
[4][FM91].
[5][Fer78], [Fera], [Ferb], [Ferc], [Ferd], [Fer06], [Fer01c], [Fer01d], [Fer01b], и [Fer01a].
[6][Gas03].
[7][Gas91] и [Gas96].

зования штата Сан-Паулу в Бразилии. Быть приглашенным к участию в этом проекте было большой честью для меня. Помощь, которую я получил от министерства образования и от координационной группы образовательных проектов Университета Кампинас, GGPE — UNICAMP, а также плодотворное общение с учителями средней школы, принимавшими участие в наших занятиях, были очень продуктивными и стимулирующими для меня. Значительную пользу мне принесли и многочисленные обмены идеями с преподавателями Университета Кампинас, которые участвовали в этом проекте. В рамках этой деятельности я решил передать учителям средней школы то, чему я научился у Норберто Феррейра. В результате я вернулся к экспериментам с целью написать эту книгу и сделать весь этот интересный материал доступным более широкой аудитории.

Вдохновением для большинства описанных в этой книге экспериментов послужили оригинальные работы обсуждаемых здесь ученых, а также книги и статьи Норберто Феррейра и Альберто Гаспара. С 2004 года я обнаружил другие печатные работы и интересные сайты, которые были чрезвычайно полезны для моего самообразования в этой области — такие как сайт *Feira de Ciências*, организованный Луисом Феррас Нетто.[8]

Джон Л. Хейлброн предложил некоторые улучшения в первой версии тома 1 этой книги. Его большая работа, *Electricity in the 17th and 18th Centuries: A Study in Early Modern Physics*,[9] была нашим главным источником исторической информации, связанной с электростатикой. Arthur Baraov, Sérgio Luiz Bragatto Boss, Juliano Camillo, Daniel Gardelli, Robert W. Gray, John B. Eichler, Steve Hutcheon, C. Roy Keys, Breno Arsioli Moura, Anabel Cardoso Raicik, Fabio Miguel de Matos Ravanelli, João Ricardo Neves da Silva и Bertrand Wolff сделали ряд важных предложений по улучшению ранних версий тома 1 и 2 этой работы.

Я благодарен Артуру Бараову за русский перевод первого тома этой работы,[10] и Pietro Cerreta, Andrea Cerreta, Raffaele Cerreta, Rita Serafini и Riccardo Urigu за перевод и публикацию этой книги на итальянском языке.[11] Pietro Cerreta, Derk Frerichs и Stephan Pfeiler сняли несколько видео роликов по материалам этой книги .[12] Я благодарю также Fernando Lang da Silveira и Jenaro Guisasola за их рецензии этой книги.[13]

Рисунки для тома 1 этой книги подготовил Daniel Robson Pinto, через стипендию от SAE/UNICAMP, который мы благодарим за эту поддержку. Daniel помог также получить старые рисунки и ссылки.

Я хотел бы также поблагодарить еще несколько людей за их предложения, обсуждения и ссылки: Dayane de Souza Bancoff, Christine Blondel, Paolo Brenni, Thiago Augusto de Lima Burgo, João José Caluzi, Hugo Bonette de Carvalho, Danylo do Amaral Cavalcanti, João Paulo Martins de Castro Chaib,

[8] [Net].
[9] [Hei99].
[10] [Ass15b].
[11] [Ass17].
[12] [Cer14a], [Cer14b], [Cer17] и [Fre].
[13] [Sil10c] и [Gui12].

Asit Choudhuri, Roberto Clemente (in Memoriam), Silvio Dahmen, Charbel El-Hani, Henrique Ennes, Moacir Pereira de Souza Filho, Junichiro Fukai, Cláudio H. Furukawa, Hans Gaab, Fernando Galembeck, Robert Harry van Gent, Harald Goldbeck-Löwe, Jürgen Gottschalk, Jenaro Guisasola, Hermann Härtel, Peter Heering, Elizabeth Ihrig, Antonio Iovane, John Jenkins, Basilio José Augusto José, Kostas Kampourakis, Siegfried Kett, Martin Kostal, Ellen Kuhfeld, Wolfgang Lange, Fabio Menezes de Souza Lima, Lin Liu, José Joaquín Lunazzi, Ceno Pietro Magnaghi, Francisco das Chagas Marques, Thiago Marques, Michael Matthews, Alexandre Medeiros, Eduardo Meirelles, Manoel Guilherme da Silva Mello, Mahmoud Melehy (in Memoriam), Paulo Henrique Dias Menezes, Dennis Nawrath, Marcos Cesar Danhoni Neves, Horst Nowacki, Ronaldo Furtado de Oliveira, Martin Panusch, Sônia Peduzzi, Luiz O. Q. Peduzzi, José Rafael Boesso Perez, Gerald H. Pollack, Eugênio Maria de França Ramos, Karin Reich, Edson Eduardo Reinehr, Ricardo Rodrigues, Waldyr Alves Rodrigues Jr. (in Memoriam), Torsten Rüting, Dirceu Tadeu do Espírito Santo, Emely Giron dos Santos, Wayne M. Saslow, Daniel dos Anjos Silva, Carlos Augusto Silva, Valter Aparecido da Silva Junior, Leandro Herculano da Silva, Fernando Lang da Silveira, Moacir Pereira de Souza Filho, Julian David Medina Tamayo, Milton G. Tarazona, Christian Ucke, Alvaro Vannucci, Geraldo Magela Severino Vasconcelos, Haroldo Fraga Campos Velho, Greg Volk, Karl-Heinrich Wiederkehr (in Memoriam), Bernd Wolfram и Gudrun Wolfschmidt.

Я хотел бы поблагодарить Институт физики и математики, координационную группу образовательных проектов и Fundo de Apoio ao Ensino, à Pesquisa e à Extensão—FAEPEX из Университета Кампинас — UNICAMP, который дал необходимую поддержку для проведения этой работы. Я благодарю также Институту истории естественных наук Гамбургского университета и Фонду имени Александра фон Гумбольдта Германии за научную стипендию 2009 года, во течение которого мы собрали значительный библиографический материал для этой книги.

Roy Keys, редактор Apeiron, был моим сторонником в течение многих лет. Не будь его поддержки, некоторые из моих книг, возможно, не были бы опубликованы. Он проделал отличную редакционную работу для этой книги.

Andre Koch Torres Assis
Institute of Physics
University of Campinas—UNICAMP
13083-859 Campinas, SP, Brazil
E-mail: assis@ifi.unicamp.br
Homepage: www.ifi.unicamp.br/~assis

Глава 1

Введение

1.1 Янтарный эффект

Эксперимент 1.1 - *Электризация тела трением*

Самый простой и самый старый эксперимент с электричеством, который породил эту область исследований, называется *янтарным эффектом*.[1] Первоначально он был выполнен с янтарем (*электрон* по-гречески), который представляет собой твердую и ископаемую смолу. Он будет воспроизведен здесь с помощью пластиковой соломы или акриловой линейки. Это поведение также называется трибоэлектрическим эффектом или трибоэлектричеством. Префикс "трибо" тоже имеет греческое происхождение, т. е. трение или тереть. Этот эффект связан с электризацией тел, получаемой трением.

Поместите несколько кусочков бумаги на стол. Поднесите акриловую линейку или пластиковую солому близко к кускам бумаги, стараясь не касаться бумаги. Ничего не происходит с кусками бумаги, Рис. 1.1.

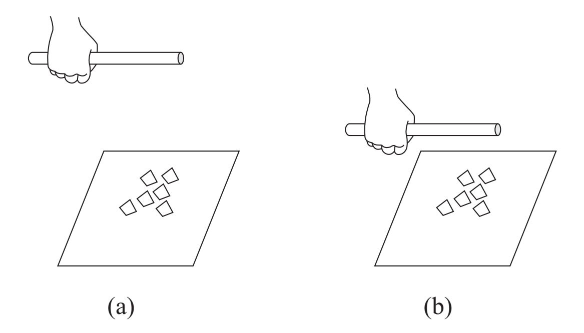


Рис. 1.1: (a) Пластиковая солома вдали от кусочков бумаги. (b) Когда пластиковая солома подносится к кускам бумаги, с ними ничего не происходит.

[1] Эксперимент 2.1 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

Теперь потрите линейку или соломку волосами, листом бумаги или хлопчатобумажной тканью, быстро двигая ее вверх и вниз. Мы представляем потертую область соломы буквой F, от слова *friction*, Рис. 1.2.

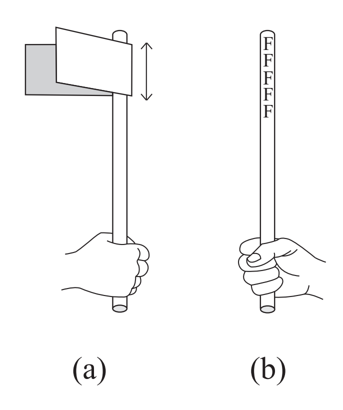


Рис. 1.2: (a) Пластиковая солома, потертая бумагой. (b) Буква F представляет потертую область соломы.

Поднесите потертую солому очень близко к маленьким кусочкам бумаги, но не касаясь их. Обратите внимание, что на определенном расстоянии они прыгают на потертую солому и прилипают к ней, Рис. 1.3. Когда солома удаляется от стола, куски бумаги остаются на соломе.

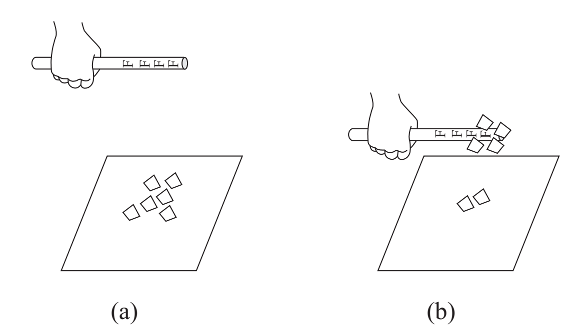


Рис. 1.3: (a) Потертая солома вдали от мелких кусочков бумаги. (b) Потертая солома притягивает к себе кусочки бумаги, когда приближается к ним.

Не все кусочки бумаги остаются прикрепленными к потертой соломе. Некоторые из них касаются соломы и падают. Другие резко отскакивают или отражаются обратно к столу. Дальнейшее обсуждение этой темы дается в разделе 4.4.

Различное поведение кусков бумаги, когда они находятся вблизи этих соломок, ведет к важному определению.

Определение 1.1

Мы говорим, что пластик, который не был потерт и не притягивает небольшие кусочки бумаги, является *электрически нейтральным*, *нейтральным*, или что он имеет *нулевой заряд*. Когда он был потерт и приобрел способность привлекать кусочки бумаги, мы говорим, что он *приобрел электрический заряд*, стал *электризованым*, *электрически заряженым* или, просто, *заряженым*. Процесс трения называется *трибоэлектрическим эффектом*, *трибоэлектризацией*, *фрикционной электризацией*, *зарядкой, полученной трением*, *зарядкой трением*, *электризацией путем трения*, или *электризацией трением*. Это притяжение иногда называют *электрическим притяжением*, или *электростатическим притяжением*.

1.2 Трибоэлектрический ряд

Как обсуждалось в томе 1 этой работы,[2] есть два вида электризованных тел, обычно называемых положительными и отрицательными телами. Когда два разных нейтральных тела потирают одно другим, одно из них становится положительно электризованым, а другой отрицательно электризованым. Если одно из этих тел является проводником, оно останется заряженным только тогда, когда оно изолировано от земли. После выполнения многих экспериментов мы пришли к Таблице 1.1.

Эту таблицу следует читать следующим образом: когда тело I потирается против тела II, положительно зарядится то тело, которое находится выше в таблице. То есть тело, которое ближе к символу $+$, станет положительно заряженым, а другое тело станет отрицательно заряженым. Например, когда пластиковая солома потирается шелком, шелк станет положительным, а пластик – отрицательным.

Определение 1.2

Список, подобный Таблице 1.1, называется *трибоэлектрическим рядом*. Префикс “трибо” происходит от греческого. Его смысл – трение или акт трения. Трибоэлектрический ряд показывает виды электризации, получаемые трением.

Пластмассовая солома и акриловая линейка становятся отрицательно электризованными при потирании волосами или листом бумаги. Поэтому отныне пластиковая солома и акриловая линейка будут представлены как имеющие отрицательные заряды (или становящиеся отрицательно электризованными) при потирании этих материалов.

[2] Глава 5 [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

+
волос
однородное стекло
человеческая кожа
синтетический полиамид
хлопок
шелк
бумага или тонкий картон
кожа
фарфор
алюминиевая фольга
дерево
бутылочная пробка
акриловая ткань
пенопласт
полиэтиленовый пакет
питьевая пластиковая солома
жесткий акрил
трубка из ПВХ
твердая резина
−

Таблица 1.1: Трибоэлектрический ряд.

1.2.1 Положение воды в трибоэлектрическом ряде

Жидкости тоже заряжаются при прохождении через твердые каналы.[3] С 1675 года было известно, что при встряхивании ртутного барометра в темноте, вспышки света появляются в вакуумной части барометра. Позднее было установлено, что причиной этих вспышек был статический заряд, вырабатывающийся в ртути при ее движении против стеклянных стенок барометра. В 1840 году водитель паровоза получил электрический шок, когда он поместил руку возле струи пара высокого давления, выходящего из котла, а другой рукой коснулся котла. Уильям Армстронг (1810-1900) исследовал это явление. Он изолировал электрический котел от земли и направил струю к металлическому изолированному проводнику. Проводник стал при этом заряженым положительно, а котел приобрел отрицательный заряд. В 1843 году он построил гидроэлектрический генератор на основе этого принципа. Майкл Фарадей (1791-1867) тоже исследовал это явление в 1843 году. Он показал, что электризация была обусловлена трением между стенкой сопла и водяными капельками в паре, вытесненном из котла. Струя сухого воздуха не вызывала никаких эффектов, но электричество появлялось при использовании влажного воздуха. Оказалось, что знак заряда, производи-

[3] [Gre94].

мого в воде, можно изменить подходящим выбором материала сопла. Он также пришел к выводу, что возбуждение электричества явно не зависит от испарения или от изменения состояния воды (из жидкого в парообразное). Кроме того, чтобы собрать достаточно большое количество электрического заряда, следует использовать чистую или дистиллированную воду. Обычная вода, которой снабжался Лондон, не производила никакого электричества, но добавление проводящих веществ в чистую воду имело такой же эффект. Он объяснил этот факт тем, что когда вода становится очень хорошим проводником, она не может удержать электричество, развившееся вследствие трения с металлом или другим телом, и тут же теряет его. Чем лучше изоляция воды, тем больше накапливается заряда, получаемого в результате трения. Сравнивая положение воды в трибоэлектрическом ряде с несколькими другими веществами, он пришел к выводу, что вода находится где-то наверху списка. Когда она текла по твердым поверхностям, она обычно становилась положительно электризованой, а твердый материал становился отрицательным. Он изложил один из своих выводов следующим образом:[4]

> 2107. Получив, таким образом, результат трения пара и воды против многих тел, я могу здесь указать на замечательное обстоятельство, что вода является положительной по отношению ко всем этим телам. Скорее всего, вода найдет свое место выше всех других веществ, включая кошачьи волосы и оксалат извести (2131).

Современные исследования подтверждают эти выводы. Недавно Бурго, Галембек и Поллак использовали воду, протекающую по трубам из разных материалов, и пришли к выводу, что заряд воды всегда положительный, за исключением случаев падения воды в воздухе.[5]

Роберт Эндрюс Милликан (1868-1953) использовал электризацию потока жидкости в своих знаменитых экспериментах с масляными каплями для определения заряда электрона. При впрыскивании капель в экспериментальную камеру, они заряжались. В своей книге 1917 года *Электрон* он упомянул следующее:[6]

> Капли [...], как правило, сильно заряжались фрикционным процессом при выдувании [масляного] аэрозоля [через небольшое отверстие] [...]

Во многих трибоэлектрических рядах, встречающихся в литературе и в интернете, воздух появляется наверху списка, даже выше воды и других материалов.

[4] [Far43b, пункт 2107].
[5] [BGP16] и [GB17, раздел 6.5].
[6] [Gre94] и [Mil17, стр. 66].

1.3 Простые и основные факты об электричестве

В томе 1 этой книги представлены экспериментальные и концептуальные основы электричества. Каждая тема вводилась с помощью некоторых простых экспериментов. Основные понятия были сформулированы на основе результатов этих экспериментов. В разделе 8.2 этой работы перечислены простые и примитивные факты или принципы, касающиеся электричества.[7] В этом разделе снова представлены эти основные факты, не объясняя их, а только описывая принципы, наблюдаемые в поведении тел. Здесь они рассматриваются как примитивные понятия. Они могут быть использованы для объяснения других явлений и более сложных экспериментов, хотя эти основные факты не объясняются. Все объяснить невозможно. Нам всегда нужно начинать с некоторых основных понятий и необъяснимых явлений, которые должны рассматриваться истинными фактами природы. Эти основные принципы затем могут быть использованы для объяснения более сложных явлений и других наблюдений в природе. Так или иначе, мы всегда вынуждены принимать некоторые основные принципы или постулаты. Эти принципы могут быть использованы для вывода других результатов. Вот простые и примитивные факты или принципы, связанные с электричеством:

1. Тела в природе могут находиться в трех разных состояниях: (а) электрически нейтральные; (б) положительно электризованные; и (в) отрицательно электризованные. Они имеют нулевой заряд, положительный заряд и отрицательный заряд, соответственно. Под «электрическим зарядом», будь то положительный или отрицательный, следует понимать *электризованное тело* или *электризованную частицу*. Тела в этих трех разных состояниях имеют соответственно (а) нулевой суммарный заряд; (б) положительный результирующий заряд; и (в) отрицательный результирующий заряд.

2. Эти состояния характеризуются наблюдаемым поведением тел. Два нейтральных тела не притягивают и не отталкивают друг друга, кроме случаев, когда они поляризованы (подробнее о поляризованном состояни в другом пункте). Существует притяжение между положительным телом и изначально нейтральным телом. Притяжение существует также между отрицательным телом и изначально нейтральным телом.

3. Тела, имеющие заряды противоположного знака, притягивают друг друга. Тела с зарядами одного знака обычно отталкивают друг друга, но в некоторых ситуациях они также могут притягивать друг друга.[8]

[7] Раздел 8.2 [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].
[8] Как показано в экспериментах раздела 7.10 [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

4. Эти силы притяжения и отталкивания возрастают по мере уменьшения расстояния между взаимодействующими телами. Интенсивность этих сил возрастает также при увеличении силы заряда в телах (или при увеличении электризации этих тел). Эти силы взаимны, действуют с одинаковой интенсивностью на каждое из тел. Они направлены по прямой, соединяющей тела, хотя и действуют в противоположных направлениях на каждое тело. Они называются электростатическими или кулоновскими силами.

5. Тела можно разделить на две группы, называемые проводниками и изоляторами. Основное различие между этими двумя группами состоит в том, что проводники имеют подвижные электризованные частицы, которые могут двигаться по всему объему проводника. Проводники допускают прохождение или ток электрических зарядов через их тела и вдоль их поверхностей. Изоляторы, с другой стороны, не имеют подвижных электризованных частиц, которые могут двигаться по телу изолятора. Электризованные частицы, принадлежащие изоляторам, могут двигаться только внутри своих молекул. Изоляторы не допускают прохождения или тока зарядов через их тела или вдоль их поверхностей.

6. Проводники и изоляторы могут быть электрически нейтральными, положительными или же отрицательными.

7. Тела можно классифицировать как проводники и изоляторы с помощью заряженного электроскопа, как будет описано в разделе 3.1. Один конец тела должен касаться картона электроскопа, а другой должен быть приведен в контакт с землей. Тела, которые разряжают электроскоп, называются проводниками, а тела, которые не разряжают электроскоп, называются изоляторами.

8. Когда заряженный проводник касается земли, он разряжается. Этот процесс называется заземлением. Но разряд не происходит для заряженного изолятора, касающегося земли.

9. Большинство твердых и жидких тел ведут себя как проводники в обычных экспериментах электростатики, и лишь немногие из них являются изоляторами. Изоляторами, например, являются: сухой воздух, янтарь, шелк, растительное масло, большинство пластмасс и смол.

10. Тела также можно классифицировать как проводники и изоляторы с использованием тестера цепи, как будет описано в разделе 3.2. Мы собираем схему, содержащую кусок провода A, батарею, промежуточный кусок провода, лампочку и еще один кусок провода B. Соединяем провода A и B с телом, который тестируется. Если лампочка включается, испытуемое тело называется проводником, в противном случае — изолятором.

11. Тело, которое ведет себя как изолятор при небольшой электрической разности потенциалов (обычно до нескольких сотен вольт), может вести себя как проводник, когда эта разность потенциалов увеличивается выше определенного значения. В обычных экспериментах электростатики мы имеем дело с большими разностями потенциалов, обычно в пределах от 1000 до 10000 вольт. В таких случаях большинство твердых и жидких тел ведут себя как проводники, в то время как только некоторые из этих тел ведут себя как изоляторы.

12. Поведение тела как проводника или изолятора также зависит от других факторов. Предположим, что один конец тела касается картона заряженного электроскопа, а другой конец тела касается земли. Факторы, влияющие на свойства этого тела, следующие: (а) Временной интервал, необходимый для разрядки электроскопа (чем больше время контакта, тем больше будет количество разряда). (б) Длина тела (чем больше эта длина, тем медленнее будет разряд). (в) Площадь поперечного сечения тела (чем больше эта площадь, тем быстрее будет разряд). В главе 3 этой книги дано детальное исследование этих факторов.

13. Нейтральные тела могут заряжаться через различные механизмы. Наиболее распространенным методом является трение двух нейтральных тел. Эти два тела могут быть оба изоляторами, оба проводниками или изолятор + проводник. После трения одно из потертых тел становится положительным, а другое отрицательным. Какой из них станет положительным или отрицательным, будет зависеть от их расположения в так называемом трибоэлектрическом ряде. Этот ряд получен эмпирическим путем. Кроме того, для сбора зарядов с проводника, который подвергается трению, он должен быть полностью изолирован от земли. Его, например, можно держать за изолирующую ручку.

14. Изоляторы заряжаются только на потертой части их поверхностей. С другой стороны, заряды, полученные трением проводников, распространяются по их внешним поверхностям, когда проводники полностью окружены изоляторами. Если потертый проводник заземлен (непосредственно или через другое проводящее тело), то заряд, который он приобрел при трении, немедленно нейтрализуется землей.

15. Нейтральный проводник может также приобретать заряд от электризованного изолятора, когда они вступают в контакт друг с другом, без всякого трения. В качестве примера этого процесса можно использовать бумажный диск, висящий на шелковой нити электрического маятника. Бумажный диск притягивается находящимся вблизи электризованным пластиком, касается этого пластика и затем отталкивается от него. Этот механизм называется ПКО: притяжение, контакт и отталкивание. Раздел 4.4 анализирует этот механизм. Заряд, полученный проводником, имеет тот же знак, что и заряд электризованного

изолятора. В этом процессе количество заряда, теряемого изолятором, равно количеству, полученному проводником. С другой стороны, величина заряда, приобретаемого нейтральным изолятором при касании другого электризованного изолятора, незначительна при условии, что они не подвергаюся при этом трению между собой.

16. Проводники, изолированные от земли, поляризуются электрически в присутствии заряженного тела. Часть проводника, которая находится ближе всего к заряженному телу, электризуется зарядом противоположного знака. Самая дальняя часть проводника электризуется зарядом того же знака, что и соседнее тело, когда проводник электрически изолирован. Если изолированный проводник делится на две части в присутствии находящегося рядом заряженного тела, эти части будут электризованы зарядами противоположного знака.

17. Если проводник заземлен в присутствии находящегося рядом заряженного тела, то часть проводника, которая находится ближе всего к заряженному телу, электризуется зарядом противоположного знака. Часть проводника, которая находится дальше всего от заряженного тела, будет нейтрализована Землей. Если мы удалим заземление, а заряженное тело останется вблизи проводника, проводник будет электризован зарядом противоположного знака.

18. Молекулы изолятора поляризуются в присутствии заряженного тела. Часть любой молекулы, которая ближе (дальше) от заряженного тела, электризуется зарядом противоположного (того же) знака, что и заряженное тело. Эти поляризованные заряды находятся в пределах молекулы и не перемещаются вдоль изолятора. Более того, они не переходят к проводнику, который вступает в контакт с изолятором.

19. Число положительных и отрицательных частиц в поляризованных проводниках, расположенных вблизи заряженного тела, увеличивается, когда расстояние между проводником и заряженным телом уменьшается. То же самое происходит с эффективными поляризованными зарядами изоляторов вблизи заряженного тела.

20. С увеличением степени электризации близлежащего заряженного тела, имеет место повышенная поляризация проводников и изоляторов.

21. При электризации или поляризации проводников и изоляторов, сила неэлектростатического происхождения удерживает электризованные частицы на поверхностях этих тел.

22. Сила неэлектростатического происхождения также отвечает за создание противоположных зарядов при трении этих тел друг против друга. В главе 14 приведены примеры различных ситуаций, требующих существования подобных сил неэлектростатического происхождения.

Описывая эти простые факты, мы говорим в общих терминах, ссылаясь неявно на эксперименты, описанные в томе 1 этой книги. Все эти эффекты зависят от порядка величин, имеющих место в экспериментах, всегда есть исключения во всех экспериментальных описаниях. Например, когда мы говорим, что два нейтральных тела не взаимодействуют друг с другом, мы не рассматриваем гравитационное притяжение между ними. Причина в том, что это гравитационное взаимодействие не наблюдается нашими чувствами или не может быть обнаружено в обычных экспериментах с участием небольших легких тел. Гравитация проявляет свое влияние только тогда, когда хотя бы одно из тел имеет астрономические размеры, как планета Земля. Когда мы говорим, что заряженное тело притягивает тело, которое изначально нейтрально, мы подразумеваем легкие тела или тела, поддерживаемые нитями таким образом, что существует лишь малое сопротивленние боковому движению этих тел. Тогда эти первоначально нейтральные тела будут в состоянии двигаться к заряженному телу, когда между ними есть притяжение. Более того, чтобы это притяжение можно было наблюдать, расстояние между взаимодействующими телами не должно быть большим, а заряд натертого тела не должен быть незначительным, в противном случае эти эффекты не будут заметны. Аналогичные замечания можно сделать и по отношению к другим принципам.

1.3.1 Мы не объясняем эти факты — они просто перечислены

Вышеприведенные простые и примитивные факты об электричестве не были объяснены нами. А некоторые вещи не совсем были оправданы:

- Существование двух видов электричества (положительное и отрицательное) вместо 1, 2, 3, 4, ... или даже бесконечного количества различных видов электричества.

- Причины, по которым заряды противоположного знака притягивают друг друга, а заряды одного знака – отталкивают.

- Причина, по которой электростатическая сила зависит от расстояния между взаимодействующими телами.

- Механизмы, ответственные за электризацию трением.

- Порядок трибоэлектрических рядов. То есть мы не объясняем, почему какое-то тело становится положительно заряженным, а другое тело электризуется отрицательно при их трении между собой.

- Происхождение неэлектростатической силы, ответственной за разделение противоположных зарядов в янтарном эффекте.

- Причина, по которой некоторые тела ведут себя как проводники, а другие – как изоляторы.

- Причина, по которой проводимость тела зависит от различных факторов, таких как: разность потенциалов, действующая между ее концами, длина и площадь поперечного сечения тела, его температура и т. д.

- Происхождение неэлектростатической силы, ответственной за поддержание в состоянии покоя электризованных частиц в проводниках и изоляторах, которые заряжаются или электризуются.

- и т. д.

1.3.2 Смысл некоторых выражений

Здесь стоит упомянуть различие, которое делает Гаспар в отношении некоторых простых выражений, которыми обычно пользуются в учебниках по физике, а именно:[9]

Некоторые авторы пишут, что «масса m оказывает силу» или что «заряд q оказывает силу». Эти два выражения физически некорректны. Масса и заряд – свойства материи, но сами они не являются вещами. Тело, частица, материальная точка или аналогичная концепция – это та сущность, которая может оказывать воздействие на другое тело. Всякое тело имеет массу и может иметь электрический заряд. Но нет массы без тела. Аналогично, нет заряда без тела. Поэтому, если мы хотим говорить правильно, некорректно говорить о «массе m» или о «заряде q» без указания тела, несущего эту массу или этот электрический заряд. Обычно в подобных выражениях подразумевается тело, несущее массу или заряд. Однако упущение тела при упоминании массы m или заряда q не способствует пониманию концепции. По этой причине мы будем избегать этих выражений.

Мы согласны с этими замечаниями Гаспара.

В этой книге представлено только макроскопическое описание явлений. Мы не будем подробно излагать атомную модель. Поэтому мы будем говорить об электризованных телах или электризованных частицах.

[9] [Gas00, стр. 22] и [Gas13, стр. 25].

Глава 2

Электрические инструменты

В этой главе представлены некоторые основные электрические инструменты, которые будут использованы в этой книге.

2.1 Список материалов для экспериментов

Ниже перечислены некоторые материалы, которые нам понадобятся для экспериментов. Лучше подготовить их заранее.

- Пластиковые соломки, акриловая линейка и трубка из ПВХ.
- Бумажная салфетка и полиэтиленовые пакеты.
- Тонкий картон.
- Бумага (размер A4) и алюминиевая фольга.
- Тонкая бумага (типа той, которая используется для изготовления воздушных змей или для обертывания хрупких подарков).
- Катушка из шелковой нити (или катушка из синтетической полиамидной нити, например нейлона или полиэфирной нити).
- Катушка из хлопковой нитки и шпагата.
- Скрепки для бумаг, шпильки, иглы и гвозди.
- Бутылочные пробки.
- Кухонное растительное масло.
- Деревянные шампуры и металлические провода.
- Подставки для электрических маятников и электроскопов изготавливаются из тонких пластиковых кофейных чашек, бумажных скрепок и гипсового теста.

- Изолированный медный провод, батареи и лампочки накаливания.
- Неоновая лампа и светодиод (светоизлучающий диод). Эти два материала не обязательны.
- Клейкие ленты (например, офисная лента PSA, волшебная лента, невидимая лента, липкая лента, целлофановая лента, хирургическая или медицинская лента, электрическая или изоляционная лента).
- Жестянные банки.
- Пластиковые бутылки (200 или 300 мл).
- Стеклянные, металлические и пластиковые стаканчики.
- Сковородка для пиццы, металлические сковородки для пирога, алюминиевые или железные ковшики.
- Электреты будут изготовлены из парафина, полученного из свечей или приобретенного в виде плиты или таблетки. Некоторые электреты будут сделаны из карнаубского воска, но можно обойтись без этого материала, если трудно его найти.
- И другие материалы, которые будут описаны в соответствующих разделах.

2.2 Электроскоп: самый важный инструмент электростатики

В томе 1 этой книги мы построили несколько электрических устройств, а именно: перпендикуло, металлический версориум, версориум Дюфе, электрический маятник, маятниковая нить, электроскоп и коллектор заряда. Электроскоп, несомненно, является самым важным инструментом, поскольку он позволяет отличить практически проводник от изолятора. Перед началом любого электрического эксперимента, или сборки любого устройства, необходимо проверить используемые материалы, чтобы выяснить, проводят они электричество или нет. Этот тест очень важен. Многие эксперименты не будут работать или не будут функционировать должным образом из-за того, что люди не обращают внимания на этот важный аспект. Например, люди могут подумать, что кусок резины будет изолятором поскольку он изготовлен из резины. Однако в действительности многие виды резины ведут себя как проводники в электростатических экспериментах. Если тело или инструмент, который изучается или используется, соединен с землей через кусок такой резины, электрические заряды не будут накапливаться в теле или приборе из-за фактического заземления. Поэтому ожидаемые электрические эффекты не будут наблюдаться. Человек, выполняющий эксперимент и не подозревающий об этом важном факторе, будет разочарован. Он

не поймет причину провала эксперимента или плохого поведения инструмента.

Подставка, которая будет использоваться в большинстве экспериментов с электроскопом и электрическим маятником, изготавливается из пластикового стаканчика для кофе. Сделайте небольшое отверстие в нижней части стаканчика и пропустите через него обе ножки бумажной скрепки. Заполните стаканчик влажным гипсовым тестом или влажным белым цементом. После того, как заполнитель высохнет, переверните стаканчик дном вверх, Рис. 2.1.

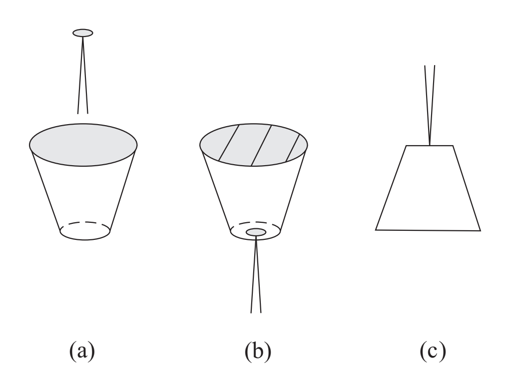


Рис. 2.1: (a) Тонкая пластиковая чашка для кофе и бумажная скрепка. (b) Чашка, заполненная влажным гипсовым тестом. (c) Подставка для электрического маятника и электроскопа.

Можно использовать и другие опоры. Примером может служить кусок пластилина с воткнутым гвоздем или бумажной скрепкой. Гвоздь нужно будет вставить в солому, поддерживая ее в вертикальном положении, поэтому толщину и длину гвоздя следует выбрать соответствующим образом.[1] Еще один пример подставки – деревянная доска, тарелка или чашка из пластика или пенополистирола с отверстием посередине для фиксации вертикальной соломы.[2]

Здесь мы представляем простой электроскоп, используемый во всех экспериментах тома 1 этой книги, Рис. 2.2:[3]

Тонкий картон может иметь, например, размеры 7 x 10 см, длинная сторона при этом расположена вертикально. Прикрепите сзади картона пластиковую солому двумя кусочками липкой ленты. Лента не должна выходить за пределы краев. Верхний конец соломы должен оставаться близко к верхнему краю прямоугольника, не выходя за его пределы. Вырежьте небольшую полоску папиросной бумаги (или бумаги для изготовления воздушных змей или обертывания хрупких подарков) шириной от 1 до 3 мм и

[1] [FM91, стр. 10], [Ferb, Материал для электростатических экспериментов, стр. 1-2], раздел 4.4 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

[2] [Gas03, стр. 225-6].

[3] Разделы 6.1 и 6.5 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

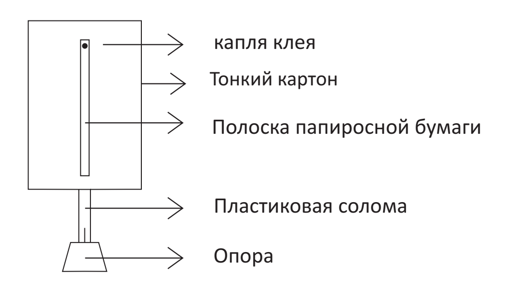


Рис. 2.2: Электроскоп.

длиной от 6 до 9 см. Эффекты, описанные в этой книге, становятся более заметными при использовании очень тонкой и легкой полосы. Приклейте верхний край этой полоски к середине верхней части прямоугольника. Полоска не должна складываться и не должна выходить за нижний край прямоугольника. Полоску можно также фиксировать небольшим куском клейкой ленты вместо клея, при условии, что лента не выходит за край прямоугольника, Рис. 2.3.

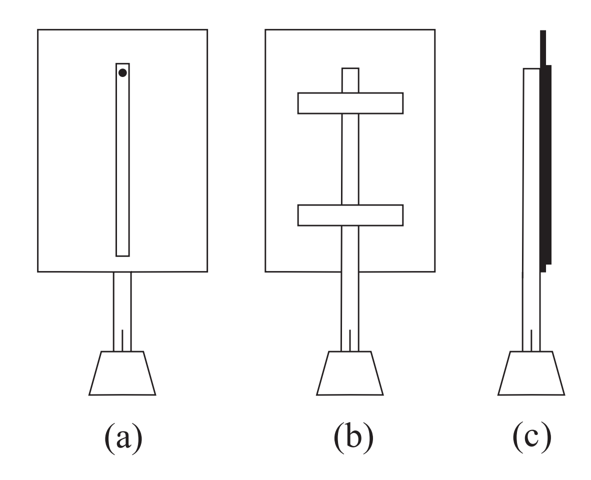


Рис. 2.3: (a) Классический электроскоп. (b) Вид сзади. (c) Вид в профиль.

2.2.1 Основные части электроскопа

В обычных экспериментах электростатики тонкий картон и бумажная полоска ведут себя как проводники. Сухой воздух вокруг электроскопа ведет себя как изолятор. Пластиковая солома, поддерживающая прямоугольник, также ведет себя как изолятор, являясь самым важным элементом электроскопа. Она предотвращает утечку заряда с электроскопа на землю. На Рис. 2.4 представлены основные компоненты электроскопа.

Пластиковая солома не может быть заменена деревянным шампуром

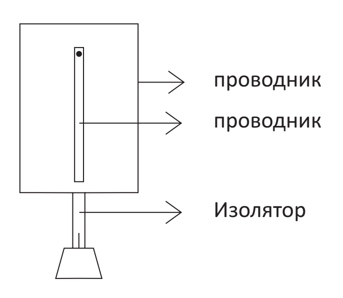


Рис. 2.4: Компоненты электроскопа.

или металлической проволокой поскольку они ведут себя как проводники в электростатике. Если бы мы заменили пластиковую солому деревянным шампуром, электроскоп всегда разряжался бы в землю после царапания его картона электризованной акриловой линейкой. Поэтому невозможно было бы электризовать его посредством трения.

2.2.2 Сравнение электроскопа, изготовленного с золотым листиком, с электроскопом, выполненным с использованием недорогих материалов

В современных учебниках электроскоп вводится при обсуждении проводников и изоляторов, или при их электризации индукцией или поляризацией. Речь обычно идет об электроскопе с золотым листиком. Он имеет два подвижных золотых листка, которые открываются при электризации. В учебниках обычно не пишут, как изготовить электроскоп на основе простых и дешевых материалов.

Однако электроскоп, представленный в этом разделе, работает не хуже любого электроскопа с золотым листком. Он чрезвычайно чувствителен. Его полоска из папиросной бумаги легко поднимается даже при очень низкой электризации инструмента. Полоска очень легкая и крепится к картону на его верхнем конце каплей клея. Остальная часть полосы может легко отклоняться от картона, когда инструмент приобретает небольшое количество заряда. Пластмассовая солома – отличный изолятор, предотвращающий утечку заряда в землю, особенно в сухую и холодную погоду.

Основным преимуществом этого инструмента по сравнению с электроскопом с золотым листком является его простота и дешевизна – его может легко изготовить учитель и любой ученик, и он почти ничего не стоит. Этот прибор очень чувствителен, и мы можем проделать бесчисленные эксперименты с ним. Это обеспечивает большую самостоятельность для студентов, и они могут легко приобретать с его помощью знания в электростатике.

Обычный студент не будет конечно пытаться построить электроскоп с золотым листиком. В конце концов, такой инструмент будет очень дорогим, потому что он содержит золото. Это может создать впечатление, что такой прибор может быть изготовлен только специалистом ввиду его сложности.

Многие студенты могут даже вообразить, что внутри стеклянной бутылки есть вакуум, который защищает электроскоп. Поэтому большинство учеников теряет интерес к описанию электроскопа, которое дается в учебниках. Это не способствует стимулированию творчества поскольку им не говорят, что они могут сами изготовить аналогичный инструмент с помощью простых материалов. В результате многие из них никогда так и не попробуют провести эти простые эксперименты самостоятельно, ограничиваясь данными в учебниках описаниями экспериментов.

2.2.3 Электроскоп и открытие космических лучей

Чтобы проиллюстрировать важность электроскопа, можно сослаться здесь на открытие космических лучей. Давно было известно, что электризованный электроскоп медленно разряжается в открытом воздухе. Одной из причин проводимости воздуха является наличие заряженных ионов в атмосфере, т. е. наличие подвижных электризованных частиц. В 1896 году Анри Беккерель (1852-1908) подтвердил, что соли урана излучают ионизирующие лучи, которые увеличивают проводимость воздуха. В частности, γ-лучи (высокочастотное электромагнитное излучение) обладают подобным ионизирующим свойством. Они проникают в воздух на определенную глубину, взаимодействуя при этом с нейтральными атомами воздуха и ионизируя их. Чтобы выяснить первопричину ионизации воздуха, в начале XIX века ученые начали изучать проводимость атмосферы в зависимости от высоты над землей. Большинство исследователей этого периода считали, что источник ионизирующего излучения – это радиоактивные вещества, находящиеся внутри Земли. Фундаментальные исследования по этой теме провел ученый Виктор Франц Гесс (1883-1964). Его основные исследования космических лучей были выполнены между 1911 и 1913 годами. В этот период он совершил воздушные полеты с электроскопами на борту, разработанными Теодором Вульфом (1868-1946), где о степени электризации можно было судить по расхождению двух проводящих элементов. Гесс наэлектризовал свои электроскопы до определенного угла расхождения между элементами и измерил интервал времени, необходимый для разрядки электроскопов в зависимости от высоты воздушного шара. Он совершил полеты до 5,3 км над уровнем моря и обнаружил, что уровень излучения уменьшался вплоть до высоты около 1 км, после чего значительно увеличивался с ростом высоты, достигая значение на высоте около 5 км в два раза выше, чем уровень радиации на уровне моря. В результате он пришел к выводу, что основное ионизирующее излучение не имеет земного происхождения. Он летал также ночью и во время солнечного затмения, и нашел, что уровень излучения имел значение, близкое к дневному, и, следовательно, Солнце тоже не было источником этого излучения. Его окончательный вывод состоял в том, что проникающее в атмосферу излучение имело космическое происхождение. Оно получило название «ультраизлучение». Современное название «космическое излучение» было введено Робертом А. Милликаном в 1925 году. Он исследовал космические лучи и фотоэлектрический эффект, получив Нобе-

левскую премию в 1923 году за измерение заряда электрона, как описано в разделе 1.2.1. Гесс получил Нобелевскую премию по физике в 1936 году за открытие космической радиации, разделивши ее с Карлом Дэвидом Андерсоном (1905-1991), американским физиком, который открыл позитрон в 1932 году.

Таким образом электроскоп сыграл важную роль при создании совершенно новой области исследований в физике – космической радиации.

2.3 Версориум

Самые ранние электрические инструменты – перпендикуло Джироламо Фракасторо (1478-1553) и версориум Уильяма Гильберта (1544-1603).[4] Здесь представлены основные типы версориума.

2.3.1 Металлический версориум на булавке

Простой версориум легко сделать с помощью латунной или стальной скрепки. Круглое основание бумажной скрепки нужно слегка продавить в центре. Она будет поддерживаться булавкой, закрепленной на жестком основании. Чтобы продавить центр бумажной скрепки, используйте гвоздь и молоток, но осторожно, чтобы не продырявить насквозь. Затем ножки бумажной скрепки следует согнут вниз так, чтобы она приобрела форму перевернутой буквы V, после чего ее можно установить на острие булавки. Она должна свободно вращаться вокруг булавки, Рис. 2.5.

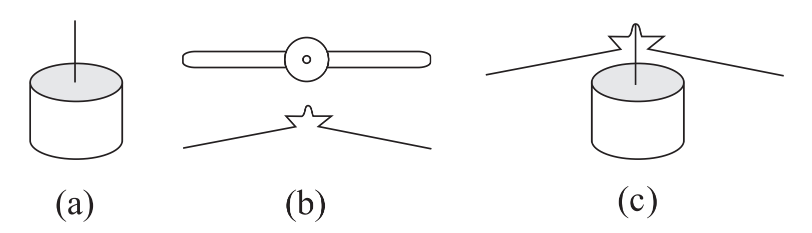


Рис. 2.5: Металлический версориум. (a) Основание версориума. (b) Стальная скрепка, вид сверху и сбоку. (c) Собранный версориум.

2.3.2 Металлический версориум на заостренном стержне из пластика

Металлический версориум в этом подразделе поддерживается на заостренном куске пластика. Основное его отличие от версориума подраздела 2.3.1 состоит в том, что пластик ведет себя как изолятор. Следовательно, скрепка будет изолирована от земли и будет удерживать суммарный заряд после

[4] Глава 3 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

электризации. Когда электризованное тело находится поблизости, изолированный версориум поляризуется.

Изготовление этого версориума состоит из нескольких простых шагов. Во-первых, отрежьте небольшой кусок пластиковой соломы длиной 5 см. Заострите один из его концов ножницами, затем установите его на опоре электроскопа Рис. 2.1, как показано на Рис. 2.6 (a). Затем поместите скрепку Рис. 2.5 (b) на этом остроконечном куске пластика, как показано на Рис. 2.6 (c).

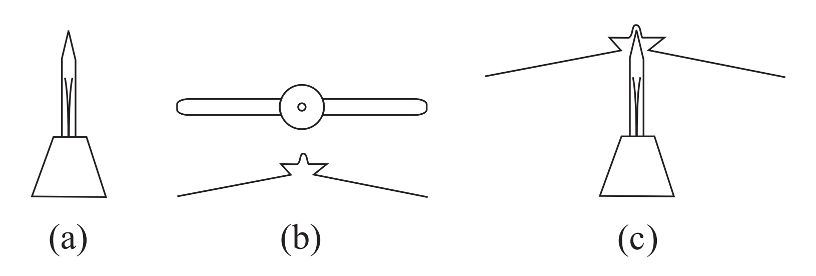


Рис. 2.6: Металлический версориум на заостренной пластиковой соломе. (a) Поддержка Рис. 2.1 с заостренной пластиковой соломой вокруг двух ножек скрепки, установленная в гипсовом тесте. (b) Стальная скрепка, вид сверху и сбоку. (c) Металлический версориум, посаженный на заостренную пластиковую солому.

2.3.3 Пластиковый версориум

На Рис. 2.7 представлен пластиковый версориум. Его основание – в этом случае гвоздь, вбитый в доску – представлено на Рис. 2.7 (a). Рис. 2.7 (b) показывает подвижную часть версориума – в этом случае полоска из пластика с булавкой в ее середине кончиком вниз. Мы будем называть эту мобильную часть «шляпой» версориума. Булавка вращается вместе со шляпой относительно земли. Эта система поддерживается на небольшой горизонтальной плоской поверхности, которая закреплена относительно земли. Готовый версориум показан на Рис. 2.7 (c), с кончиком булавки, установленным на плоской головке забитого в доску гвоздя.

Важное замечание: Чтобы предотвратить проскальзывание версориума, важно, чтобы центр тяжести шляпы и штифта был расположен ниже кончика штифта.

2.3.4 Версориум Дюфе

Версориум Дюфе можно приготовить из пластика с куском алюминиевой фольги на одном из его концов, Рис. 2.8.

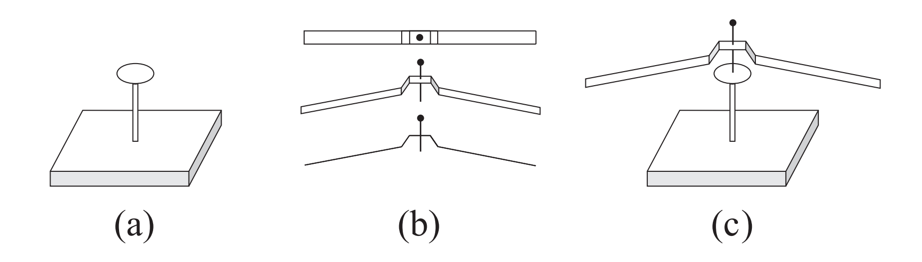


Рис. 2.7: Пластиковый версориум со штифтом, установленным в центре непроводящей полосы. (a) Фиксированное основание версориума. (b) Шляпа версориума (пластиковая полоса) с прикрепленным к ней штифтом. c) Версориум в собранном виде.

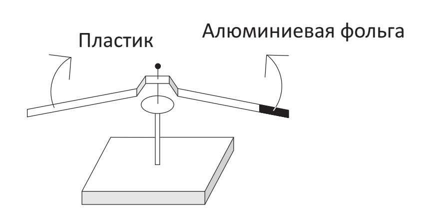


Рис. 2.8: Версориум Дюфе.

2.3.5 Основные элементы этих версориумов

Основные элементы этих четырех видов версориума представлены на Рис. 2.9.

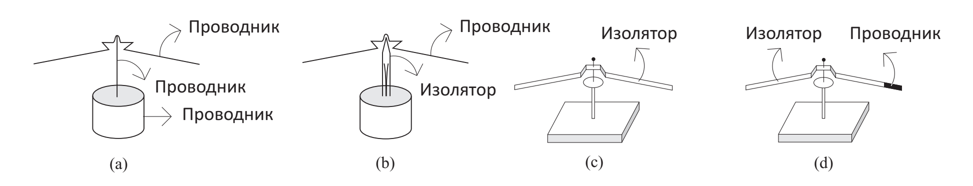


Рис. 2.9: Компоненты разных видов версориума. (a) Металлический версориум на металлическом штифте. (b) Металлический версориум на заостренной пластиковой соломе. (c) Пластиковый версориум. (d) Версориум Дюфе.

В случае металлического версориума на металлическом штифте, Рис. 2.9 (a) имеется горизонтальная проводящая полоса (например, стальная скрепка), которая покоится на вертикальном проводящем штифте, воткнутом в деревянную доску или пробку. То есть все элементы этого версориума являются проводниками. Металлический версор, на заостренной пластиковой соломе, Рис. 2.9 (b) имеет проводящую полосу, которая покоится на заостренном кончике непроводящего материала. Пластиковый версор, Рис. 2.9 (c), имеет шляпу из непроводящего материала. Штырь, проходящий через его центр, проводит электричество, хотя его состав не имеет отношения к

экспериментам. С другой стороны, версориум Дюфе, Рис. 2.9 (d), состоит из изолирующей пластиковой шляпы, имеющей проводник на одном из ее концов, а именно алюминиевую фольгу. Не имеет значения, если штифт, проходящий через его центр, выполнен из проводящего или изолирующего материала.

2.4 Электрический маятник

В этом разделе представлены основные виды электрического маятника.[5]

2.4.1 Классический электрический маятник

Классический электрический маятник представлен на Рис. 2.10.



Рис. 2.10: Электрический маятник с подставкой.

Свяжите диск из бумаги или алюминиевой фольги с нижним свободным концом нитки из шелка, полиэстера или полиамида (например, нейлона). Верхний конец этой нити привязан к пластиковой соломе. Эта пластиковая солома прикреплена под прямым углом к другой пластиковой соломе бумажной скрепкой. Вертикальная пластиковая солома поддерживается на бумажной скрепке, закрепленной в гипсовом тесте внутри пластикового кофейного стаканчика, Рис. 2.1.

2.4.2 Стрелочный маятник

Вариант этого классического маятника заменяет диск из бумаги или алюминиевой фольги небольшой стрелкой из бумаги, алюминиевой фольги или тонкого картона. Его можно назвать стрелочным маятником. Стрелка должна указывать горизонтально и подвешиваться в ее центре шелковой или нейлоновой нитью. Она может иметь длину от 2 до 5 см с вертикальной шириной вала от 0,2 до 0,5 см и максимальной шириной наконечника стрелки от 0,5 до 0,7 см. Это лишь приблизительные размеры и не столь критичны. Стрелка может быть привязана непосредственно к концу шелковой нити,

[5][FM91, стр. 47], [Ferb, Eletrização por contato: Pêndulo, p. 8; Eletrização por indução: Pêndulo, p. 14; e Campo elétrico: Vetor, p. 22], [Gas03, стр. 228-229], вместе с разделами 4.4, 4.10 и 7.6 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

как на Рис. 2.11 (a). Она также может быть закреплена вокруг небольшого куска пластиковой соломы, как на Рис. 2.11 (b).

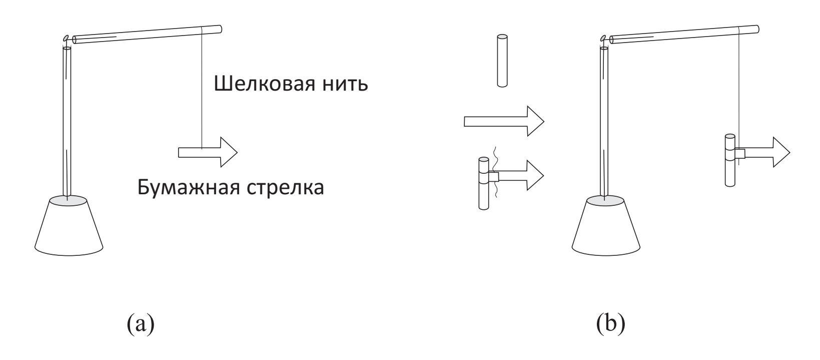


Рис. 2.11: Электрический маятник с подвешенной стрелкой.

2.4.3 Пластиковый маятник

Постройте теперь пластиковый электрический маятник, или кратко пластиковый маятник. Просто замените бумажный диск классического электрического маятника небольшим пластиковым диском, Рис. 2.12. Пластик должен быть тонким и легким, наподобие пластиковых пакетов из супермаркета.

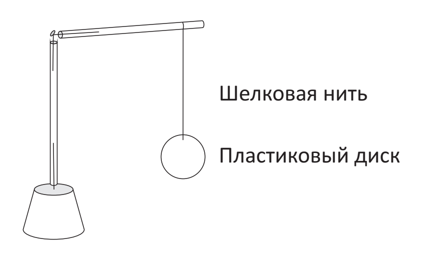


Рис. 2.12: Пластиковый маятник.

2.4.4 Основные элементы этих маятников

Основные элементы этих маятников показаны на Рис. 2.13.

2.5 Подвесная нить Грея

«Маятниковую нить» изобрел Стивен Грей (1666-1736) в 1729 году.[6]

[6] [Grab], [Grad], [Grag] и раздел 4.9 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

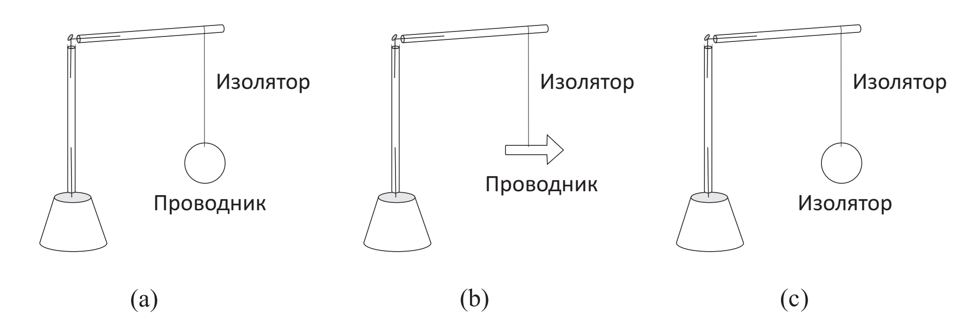


Рис. 2.13: (a) Классический электрический маятник. (b) Стрелочный маятник. (c) Пластиковый маятник.

Она представляет собой хлопчатобумажную или льняную нить, поддерживаемую деревянной палкой, Рис. 2.14 (a). Электрический маятник выполнен из шелковой или нейлоновой нити. Здесь важно использовать хлопчатобумажную или льняную нить. Держите палку рукой или прикрепите ее к другой подходящей опоре.

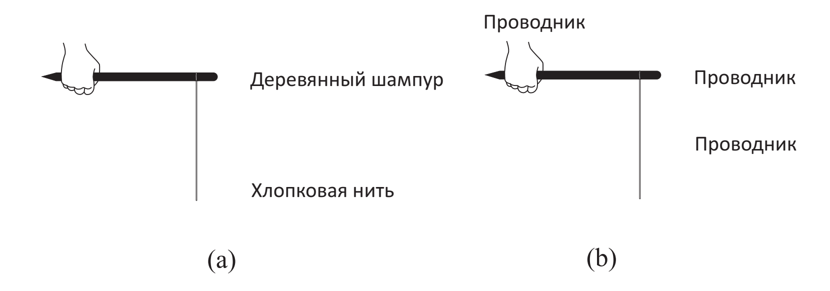


Рис. 2.14: (a) Подвесная нить Грея. (b) Основные компоненты этого инструмента.

Основные компоненты подвесной нити Грея представлены на Рис. 2.14 (b), а именно, проводящая нить, поддерживаемая заземленным проводником.

Грей использовал свою подвесную нить, чтобы проверить заряжено тело или нет. С этой целью он просто подносил нить к телу. Если нить притягивалась телом, наклоняясь к ней, это означало, что объект был электрически заряжен. Когда нить оставалась вертикальной, это означало, что тело не было электризовано.

2.6 Коллекторы зарядов

Коллекторы зарядов – это инструменты, используемые для получения электризованных частиц с любого участка поверхности электризованного или

поляризованного проводника.[7] После сбора этих зарядов можно определить их знак (положительный или отрицательный), а также их величину (то есть определить величину плотности поверхностного заряда). Их можно также использовать для переноса электризованных частиц с одного проводника на другой, которые отделены друг от друга.

Основной элемент коллектора зарядов представляет собой проводник (C), закрепленный на непроводящей рукоятке (I). Коллектор зарядов следует брать только за рукоятку, не касаясь его проводящей части, чтобы не разрядить ее. Проводящая часть коллектора приводится в контакт с изучаемым электризованным телом, чтобы снять с него небольшое количество заряда. Во время этого контакта некоторые электризованные частицы переносятся с электризованного тела на проводящий элемент коллектора таким образом, что он получает заряды того же знака, что и электризованное тело. Рис. 2.15 дает иллюстрацию типичных коллекторов заряда.

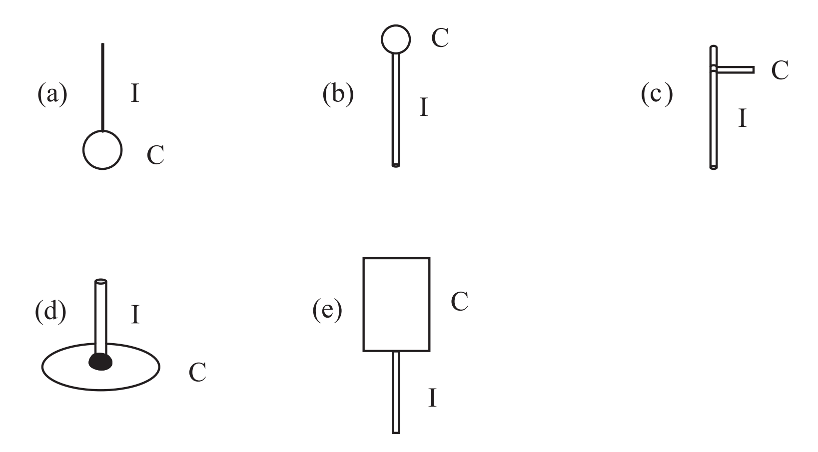


Рис. 2.15: Коллекторы зарядов, состоящие из проводящей части C и изолирующей ручки I.

Рис. 2.15 (a), например, представляет классический электрический маятник. Изолятор может быть приготовлен из шелковой, нейлоновой или полиамидной нити. В качестве проводника можно использовать диск из бумаги или алюминиевой фольги. Этот маятник можно приготовить также из небольшого пробкового шарика, наподобие электрических маятников, построенных в XVII и XVIII веках. Рис. 2.15 (b) может представлять шарик из алюминиевой фольги, соединенный с пластиковой соломой. Он может быть изготовлен также из металлической сферы, соединенной с трубой из ПВХ. Рис. 2.15 (c) представляет полосу из алюминиевой фольги, соединенную с пластиковой соломой. Рис. 2.15 (d) представляет бумажный диск или диск из тонкого картона, соединенный с пластиковой соломой с пластилином. Он также может представлять круглую крышку металлической банки

[7]Раздел 7.2 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

или сковородки для пиццы, прикрепленную в середине под прямым углом к ручке из ПВХ, акрила или твердого пластика. Рис. 2.15 (e) представляет простой электроскоп, используемый в этой книге, без полоски из папиросной бумаги. То есть, это просто прямоугольный картон, закрепленный на пластиковой соломе.

Модель на Рис. 2.15 (d) была изобретена Шарлем-Огюстеном Кулоном в 1787 году, Рис. 2.16. Она теперь известна как проверочная плоскость.[8]

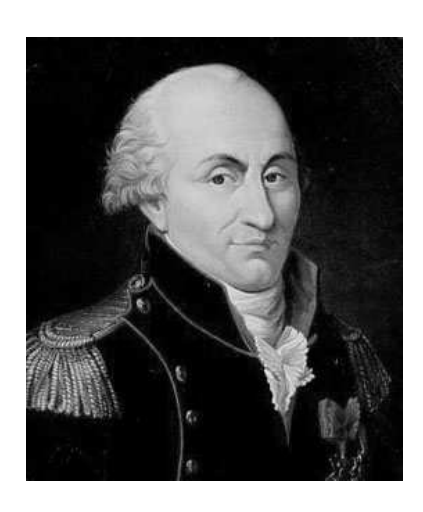


Рис. 2.16: Шарль-Огюстен Кулон (1736-1806).

Проверочная плоскость – это проводящий диск, прикрепленный в центре к изолирующей ручке. Кулон использовал ее для определения распределения заряда на поверхностях двух или трех проводников, заряженных контактом. Количество заряда, собираемого проверочной плоскостью, пропорционально локальной поверхностной плотности заряда. Модель, используемая здесь, представляет собой тонкий картонный диск диаметром 3 см. Одну из его сторон можно покрыт алюминиевой фольгой, но это не обязательно. Отрежьте кусок пластиковой соломы длиной 5 см. Он будет прикреплен под прямым углом к центру диска, как если бы он представлял ось симметрии. Солому можно прикрепить к центру диска с помощью пластилина, Рис. 2.17. При работе с проверочной плоскостью, ее нужно брать только за солому, не касаясь глины и диска.

2.7 Тестер цепи

Чтобы построить тестер цепи, используйте три куска изолированной медной проволоки, неизолированные на концах. Рис. 2.18 (a) – новая большая щелочная батарея типа D, которая генерирует разность потенциалов 1,5

[8] [Hei99, стр. 495].

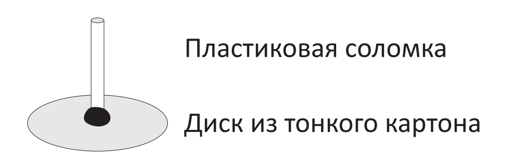


Рис. 2.17: Проверочная плоскость Кулона. Она может служить также коллектором зарядов, но мы будет всегда называть его проверочной плоскостью для ясности при описании следующих экспериментов.

вольт между полюсами, Рис. 2.18 (b) и небольшая лампочка на 1,5 вольта и розетка, Рис. 2.18 (c).

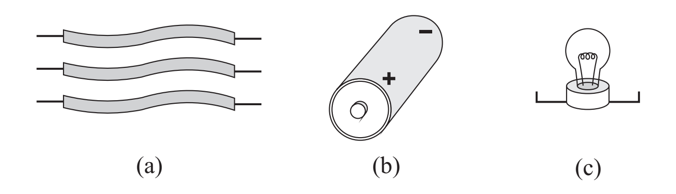


Рис. 2.18: (a) Три куска изолированной медной проволоки (оголите концы). (b) Новая батарея типа D. (c) 1,5-вольтовая лампочка и розетка.

Чтобы проверить электрическое поведение тел (проводящее или изолирующее) при небольшой разности потенциалов, мы собираем тестер цепи, указанный на Рис. 2.19.

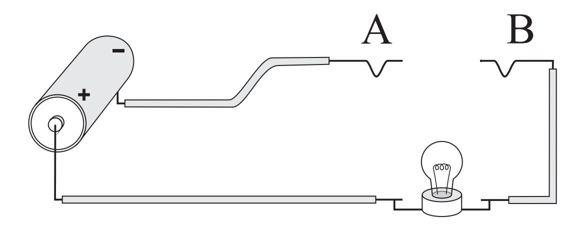


Рис. 2.19: Тестер цепи.

Можно также использовать подставку для батарей, чтобы улучшить надежность электрических соединений с проводами. Один неизолированный конец первого провода подключается к отрицательной клемме аккумулятора с помощью клейкой ленты. Другой конец этого первого провода изгибается в форме крючка и называется A, Рис. 2.19. Один неизолированный конец второго провода подключен к положительной клемме аккумулятора, а другой конец подключен к одному из разъемов розетки. Один конец третьего провода подключен к другому разъему розетки. Другой конец этого третьего провода тоже образует крючок, называемый B. Расстояние между A и B должно составлять около 10 см.

Между A и B можно размещать различные материалы, чтобы проверить их проводящие или изолирующие свойства. Когда лампочка включается, тело будет классифицироваться как проводник. Когда лампа не включается, тело будет классифицироваться как изолятор. Эти эксперименты представлены в разделе 3.2.

Глава 3

Проводники и изоляторы

Различие между проводниками и изоляторами является одним из важнейших аспектов всей науки об электричестве. Важно проверить тела, чтобы знать, ведут ли они себя как проводники или изоляторы. Этот тест следует проводить перед началом каждого эксперимента. Электроскоп является важнейшим устройством для этой цели.

3.1 Классификация веществ в качестве проводников или изоляторов с помощью электроскопа

Эксперимент 3.1 - *Зарядка электроскопа посредством контакта с электризованным телом*

Быстро потрите пластиковую соломку или акриловую линейку о волосы или лист бумаги. Проведите потертой соломой по верхнему краю электроскопа. Эту процедуру следует повторить несколько раз. После удаления потертой соломы полоска электроскопа отклоняется, указывая на электризацию электроскопа этой процедурой, Рис. 3.1. Электроскоп электризуется зарядом того же знака, что и потертая солома.[1]

Определение 3.1

Мы говорим, что электроскоп *приобрел электрический заряд через контакт с ранее заряженной соломой*, зарядился посредством контакта или *электризован контактом*. Этот процесс называется *зарядкой посредством контакта*, *переносом заряда путем контакта* или *электризацией через контакт*.

[1] Эксперимент 6.5 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

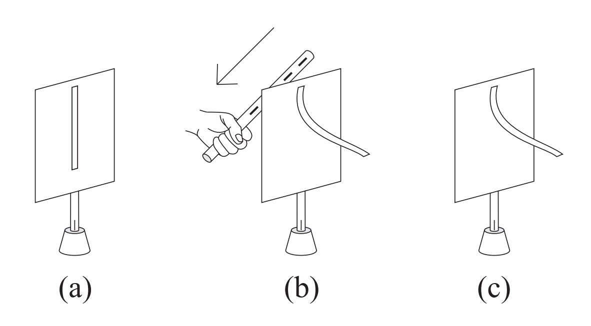


Рис. 3.1: (a) Электроскоп со свободно висящей полосой. (b) Проведите по верхнему краю прямоугольника потертой соломой. (c) При удалении соломы, полоска отходит от электроскопа.

Эксперимент 3.2 - *Разрядка электроскопа касанием руки*

Коснитесь пальцем верхний край картона заряженного электроскопа. Сразу же полоса падает и лепится к прямоугольнику. С удалением пальца, полоса остается в вертикальном положении, Рис. 3.2.

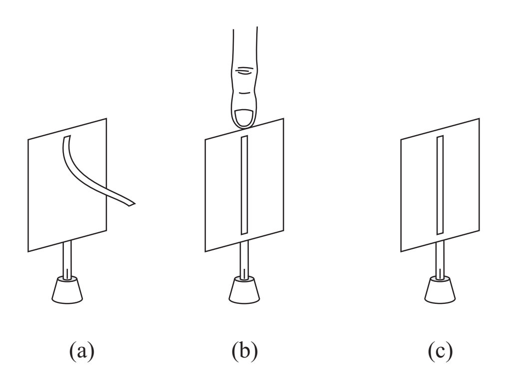


Рис. 3.2: Разрядите электроскоп, прикоснувшись к нему. (a) Первоначально заряженный электроскоп. (b) Когда палец касается верхнего края картона, полоса падает. (c) Полоска остается в вертикальном положении после удаления пальца.

Этот процесс разрядки электроскопа имеет специальное название:

Определение 3.2

Мы говорим, что заряженный электроскоп *потерял электрический заряд при контакте* с пальцем или что он был *разряжен контактом*, *электрически разряжен* или, просто, *разряжен*. Процесс называется *разрядкой контактом* или *заземлением*. Его также называют *электрическим заземлением*. Происхождение и смысл этих терминов состоит в том, что заряженное тело разряжается человеческим телом, который обычно находится в электрическом контакте с землей.

Для обозначения проводящего контакта между землей и изучаемой системой обычно используется специальный символ, а не палец, как показано на Рис. 3.3 (b).

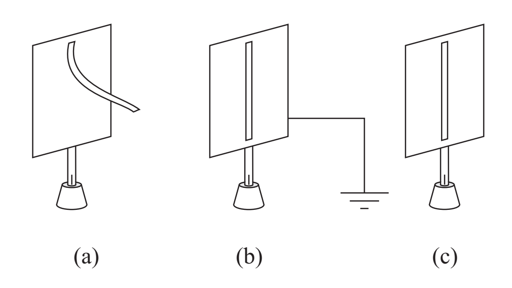


Рис. 3.3: Символ, обозначающий заземление. Он заменяет палец на Рис. 3.2.

Эксперимент 3.3 - *Касание заряженного электроскопа нейтральной пластиковой соломой*

Здесь мы представляем самый важный эксперимент, который можно провести с заряженным электроскопом. Держите один конец соломы рукой и прикоснитесь к верхнему краю заряженного электроскопа другим концом. Рис. 3.4 показывает, что с электроскопом ничего не происходит, когда нейтральная пластиковая солома касается картона. То есть электроскоп остается электризованным после удаления соломы.

Электризованный электроскоп не разряжается, когда нейтральная пластиковая солома, удерживаемая рукой, касается картона.

Эксперимент 3.4 - *Касание заряженного электроскопа металлической проволокой*

Рис. 3.5 показывает, что происходит, когда деревянный шампур или металлическая проволока в руке касается заряженного электроскопа. Полоса сразу падает, оставаясь в висячем вертикальном положении после удаления шампура.

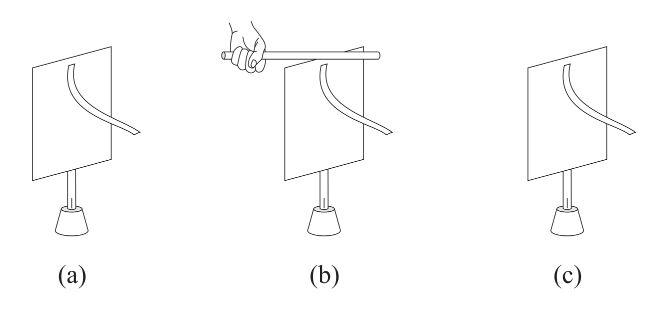


Рис. 3.4: (a) Первоначально заряженный электроскоп. (b) Держите один конец нейтральной пластиковой соломы рукой и коснитесь края электроскопа другим концом соломы. Ничего не происходит с полосой. (c) После удаления соломы, полоса остается в поднятом состоянии.

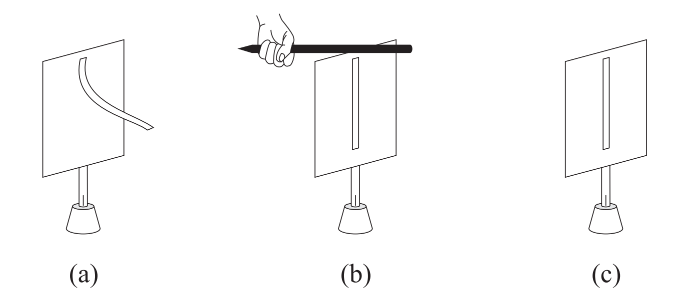


Рис. 3.5: (a) Первоначально заряженный электроскоп. (b) Держите один конец деревянного шампура рукой и прикоснитесь к верхнему краю электроскопа другим концом шампура. Полоска немедленно падает. (c) После удаления шампура, полоса остается внизу.

Электризованный электроскоп разряжается, когда кусок дерева или металла, удерживаемый рукой, касается картона. В этом эксперименте используйте голую древесину. То есть, кусок дерева не должен быть окрашен или лакирован. Краски и лаки могут вести себя как изоляторы, и этот факт может повлиять на результат этого эксперимента.

Электроскоп немедленно разряжается, когда металлическая проволока, удерживаемая рукой, касается картона. То же самое происходит с большинством древесных шампуров, удерживаемых рукой. Однако, в зависимости от вида древесины, мы можем наблюдать разряд, который не является мгновенным, и занимает несколько секунд, чтобы полностью разрядить электроскоп.

Здесь мы снова наблюдаем разряд электризованного электроскопа, как в эксперименте 3.2, Рис. 3.2. На этот раз разряд произошел через деревянный шампур или металлическую проволоку.

3.1.1 Определение проводника и изолятора, когда высокое напряжение приложено между концами тела

Электроскоп позволяет различить два типа тел в природе, а именно, так называемые *проводники* и *изоляторы*. Здесь мы приводим основные определения, относящиеся к обычным экспериментам электростатики:

Определение 3.3

Вещества, которые разряжают электризованный электроскоп, когда, держа их в руке, мы касаемся ими электроскопа, как в эксперименте 3.4, называются *проводниками электричества*, *электрическими проводниками* или просто *проводниками*. Вещества, которые не разряжают электроскоп, как в эксперименте 3.3, называются *изоляторами*, *непроводящими веществами* или *диэлектриками*.

3.1.2 Тела, которые ведут себя как проводники или изоляторы в обычных экспериментах электростатики

Выполняя процедуры, аналогичные экспериментам 3.3 и 3.4 с несколькими веществами, мы получаем следующие результаты:[2]

- **Проводники для обычных экспериментов электростатики:** Увлажненный воздух, тело человека, все металлы, бумага, тонкий картон, алюминиевая фольга, салфетка, картон, дерево, хлопок, кусочек мела, много видов стекла при температуре окружающей среды, фарфор, стена, доска, пробка, пшеничная мука, кукурузная мука, акриловая нить, соль, сахар, опилки, кожа, земля или глина, кирпич, некоторые виды резины, мыло, лед и т. д.

- **Основные изоляторы для обычных экспериментов электростатики:** Сухой воздух, природные смолы, такие как янтарь, и синтетические смолы, такие как пластмассы в целом.

Установлено, что проводящих веществ гораздо больше, чем изолирующих. Как видно из этих двух списков, большинство веществ являются проводниками, и очень мало изоляторов. Некоторые из проводников очень хорошо проводят, почти мгновенно разряжая электроскоп, как в случае человеческого тела, металлов, хлопка или бумаги. Хотя древесина – проводник, она проводит не так хорошо, как человеческое тело. На это указывает

[2] Глава 6 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

более длительный интервал времени, необходимый для разрядки электроскопа, когда древесный шампур касается картона, по сравнению с очень коротким интервалом, который требуется для его разрядки, когда палец или кусок металла, удерживаемый рукой, касается картона.

Список некоторых изоляционных веществ: сухой воздух, шелк (нить или ткань), натуральные смолы (янтарь, копал, шеллак), вместе с синтетическими смолами (в основном пластмассы, ПВХ, нейлон или полиамид, полиэфир, акрил, пенополистирол и т. д.)

Пластмассы – важное изобретение XX века. Первая синтетическая смола, бакелит, была получена Лео Хендриком Бакеландом (1863-1944). Этот материал был представлен Американскому химическому обществу в 1909 году. Его обычно считают отцом химической промышленности. Эти синтетические смолы получили общее название «пластик» из-за того, что они были ковкими и могли быть отлиты в твердые предметы любой формы. Помимо этих веществ несколько других материалов ведут себя как изоляторы: нагретое стекло, шерсть, один человеческий волос, шоколад, молотый кофе, парафиновый воск и другие виды резины (которые отличаются от проводящих видов резины).

Эти два списка не являются полными. Каждый человек может построить свой собственный электроскоп для проверки поведения разных материалов. Следует быть осторожным с этим различием, потому что есть много факторов, которые могут повлиять на проводящее или изолирующее поведение любого вещества. Среди этих факторов можно указать химический состав тела, расположенные на его поверхности примеси, процесс его изготовления, возраст материала и т. д.

Здесь мы приводим только один пример. Труба из ПВХ обычно ведет себя как хороший изолятор, так как не разряжает электризованый электроскоп. Несколько лет назад мы построили электростатический генератор, капельницу Кельвина, используя трубы из ПВХ в качестве изоляторов.[3] Чтобы построить работающее устройство, нам пришлось сделать три разных инструмента. Мы обнаружили, что в одном из предыдущих генераторов, которые не работали должным образом, возникла проблема с используемой трубкой из ПВХ. Хотя мы использовали его как изолятор, мы обнаружили, что эта конкретная трубка ведет себя как проводник. Поэтому она не позволяла накапливать заряды в генераторе. Мы не исследовали причины, по которым эта конкретная труба из ПВХ имела это аномальное поведение. Заменив эту конкретную трубку другой трубкой из ПВХ, которая ранее была проверена и показано, что она ведет себя как хороший изолятор, мы, наконец, преуспели в эксперименте. Теперь можно было получать хорошие искры с этим устройством.

Эксперимент 3.5 - *Прикосновение к заряженному электроскопу водой*

Используйте аналогичную процедуру, чтобы определить, какие жидкости являются проводниками или изоляторами. Используйте проводящую

[3] [Cam06], [CA08] и раздел 7.12 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

емкость, которая будет заполнена различными жидкостями. Чтобы узнать, является ли емкость проводником или изолятором, зарядите электроскоп и коснитесь его тонким картоном сосуда, удерживая его рукой. Предположим, что электроскоп разряжается после этого контакта. Это означает, что сосуд действительно проводит. Примерами подходящих сосудов являются емкости из металла, дерева или многих видов стекла при комнатной температуре. Затем вы можете продолжить эксперимент.

Полностью заполните сосуд жидкостью, подлежащей тестированию. Рис. 3.6 иллюстрирует, что происходит с такой проводящей жидкостью как вода из под крана, например.

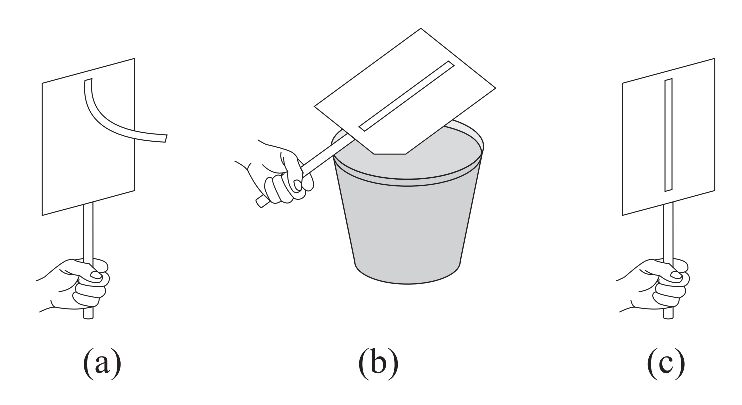


Рис. 3.6: (a) Заряженный электроскоп. (b) Мы погружаем край электроскопа в воду. Его полоса падает. (c) После вытаскивания электроскопа из воды, полоса остается внизу.

Рис. 3.6 (a) иллюстрирует заряженный электроскоп. Держите его только за пластиковую солому, не касаясь тонкого картона и поднятой полосы. В (b) мы погружаем край электроскопа в воду. Картон не должен касаться сосуда – только вода. Обратите внимание, что полоса падает. (c) После удаления электроскопа из воды, полоса остается в висячем положении.

Электроскоп разрядился через воду.

Эксперимент 3.6 - *Касание заряженного электроскопа и растительного масла*

Рис. 3.7 иллюстрирует, что происходит в случае изолирующей жидкости, такой как кухонное растительное масло. Рис. 3.7 (a) показывает заряженный электроскоп. Затем мы погружаем кромку картона в жидкость. Картон не должен касаться сосуда, только масло. Обратите внимание, что полоса остается поднятой, как на Рис. 3.7 (b). Когда электроскоп выходит из жидкости, его полоса остается поднятой, как в (c).

Заряженный электроскоп не разряжается через растительное масло.

———————————————————————————

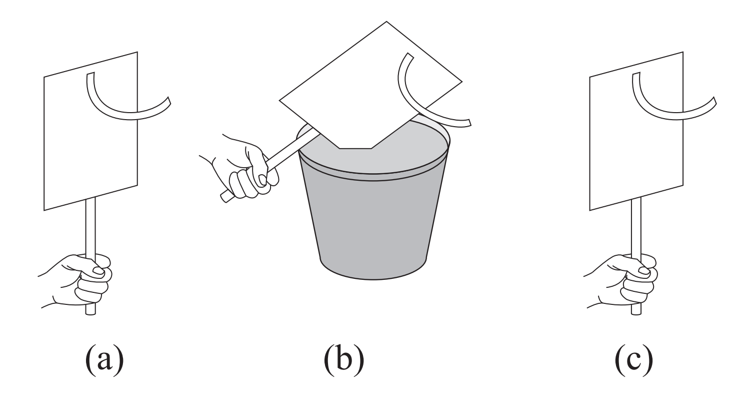


Рис. 3.7: (a) Заряженный электроскоп. (b) Мы погружаем край картона в изолирующую жидкость. Полоска остается поднятой. (c) Когда электроскоп выходит из жидкости, полоса остается поднятой.

Проведя такие процедуры, как в экспериментах 3.5 и 3.6, мы получаем следующие результаты:[4]

- **Проводящие жидкости для обычных экспериментов электростатики:**
  Пресная вода, дождь, водопроводная вода, перекись водорода (H_2O_2), деионизированная вода, дистиллированная вода, жидкий отбеливатель (гипохлорит натрия, $NaClO$), солевой раствор, спирт, шампунь, керосин, молоко, безалкогольные напитки, моющее средство, ликер из сахарного тростника, водка, моющее средство, соевый соус, уксус, жидкое мыло, мед, жидкий клей, смягчитель ткани, эмалевая краска, акриловая краска, синтетическое моторное масло и т. д.

- **Изолирующие жидкости для обычных экспериментов электростатики:**
  Расплавленный парафин и большинство видов масла.

То есть почти все жидкости повседневной жизни ведут себя как проводники. Список некоторых непроводящих жидкостей: масла в целом (пищевое растительное масло, как масло сои или канолы, оливковое масло, машинное масло, минеральное масло, масло пербы, используемое в качестве мебельного лака и т. д.). Исключением из этого списка является синтетическое моторное масло, которое ведет себя как проводник в обычных экспериментах электростатики.

Та же самая процедура, что используется для проверки какие жидкости являются проводниками или изоляторами, может быть использована для проверки проводимости муки. То есть, проводящая тарелка заполняется

[4]Глава 6 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

мукой, подлежащей проверке. Мы погружаем край заряженного электроскопа в муку и наблюдаем, падает полоска или остается поднятой. Следите за тем, чтобы картон электроскопа не касался тарелки.

Эксперимент 3.7 - *Притяжение тонкой струйки воды электризованным телом*

Этот эксперимент иллюстрирует влияние потертого янтаря, потертого пластика или потертого акрила при приближении к жидкостям. Пластиковая солома или акриловая линейка должна приближаться к жидкости, не касаясь ее, независимо от того, нейтральна ли она или была потерта ранее.

Включите кран так, чтобы тонкая струя воды текла спокойно, Рис. 3.8 (a). Поднесите нейтральную пластиковую солому близко к струйке, ничего не происходит, Рис. 3.8 (b).

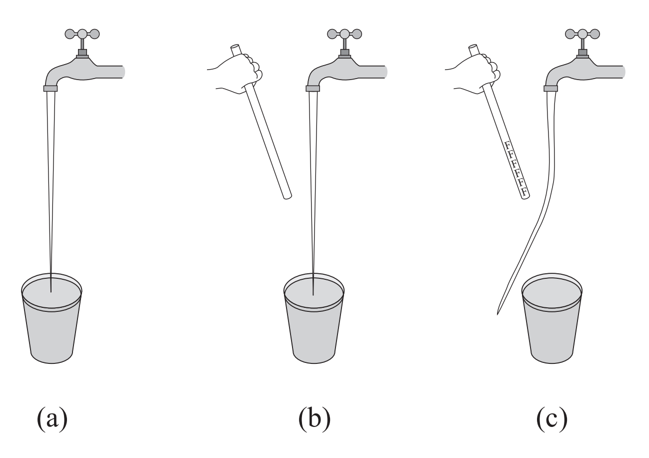


Рис. 3.8: (a) Вода течет плавно. (b) Ничего не происходит, когда нейтральная пластиковая солома приближается к потоку. (c) Потертая солома притягивает поток.

Потрите еще одну солому и поднесите ее близко к струйке. На этот раз поток заметно прогибается к потертой соломе, Рис. 3.8 (c)! Этот эффект легче увидеть, если потертую солому поместить вблизи верхней части потока, где вода имеет более низкую скорость. Иногда притяжение настолько интенсивное, что поток касается соломы. Эксперимент также работает с капельницей. Эффект более заметен при поднесении потертой соломы к более медленным каплям.

Что-то аналогичное происходит, когда потертый пластик подносится к струйке молока, моющего средства, спирта, керосина, шампуня, солевого раствора или почти любой из жидкостей, классифицированных как проводники в разделе 3.1. То есть, потоки этих жидкостей заметно притягиваются потертым пластиком.

Эксперимент 3.8 - *Электризованное тело притягивает тонкий поток растительного масла*

Повторите эксперимент 3.7, чтобы притянуть изолирующую жидкость, например, кухонное масло. Пусть масло течет плавно из бутылки или банки, Рис. 3.9 (a). Поднесите нейтральную пластиковую солому близко к струйке, ничего не происходит, Рис. 3.9 (b). Потрите еще одну соломку и поднесите ее близко к струйке. На этот раз поток немного выгибается в сторону потертой соломы, Рис. 3.9 (c).

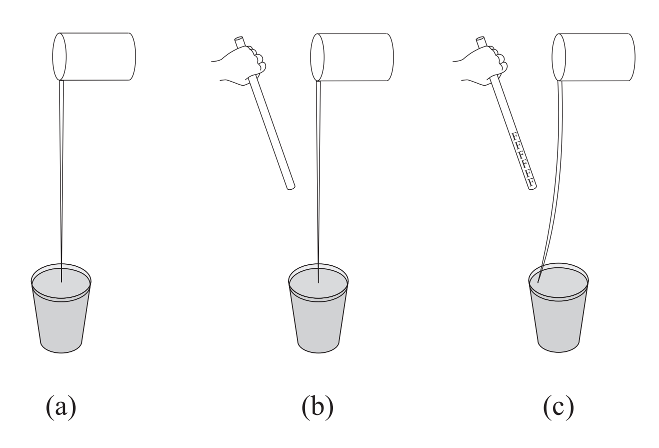


Рис. 3.9: (a) Масло течет плавно. (b) Ничего не происходит, когда нейтральная пластиковая солома подносится к потоку. (c) Потертая солома слабо притягивает поток масла.

В случае масла эффект — а именно, изгибание потока — не такой сильный, как в случае с другими проводящими жидкостями в эксперименте 3.7, например, воды на Рис. 3.8.

———————————————————————————————

Эксперименты 3.7 и 3.8 показывают, что электризованное тело притягивает проводник намного сильнее, чем изолятор.[5] Пусть имеются два вещества – проводник и изолятор – одинакового размера, веса и формы. Они расположены на одинаковом расстоянии от электризованного тела. Эксперименты показывают, что проводник испытывает большую притягательную силу, чем изолятор, от одного и того же электризованного тела. Из этих экспериментов вытекает практический принцип или эмпирическое правило, а именно: если электризованное тело заметно привлекает легкие вещества, эти вещества будут вести себя как проводники в обычных экспериментах электростатики. То есть, находясь в руке, эти вещества будут разряжать электризованный электроскоп, когда они касаются картона электроскопа.

Противоположный эффект также имеет место. То есть вещества, которые разряжают электроскоп, будут сильно притягиваться близлежащим электризованным телом. Изоляторы, с другой стороны, не разряжают электроскоп и испытывают лишь небольшую силу притяжения, оказываемую

[5] Раздел 7.7 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

близлежащим электризованным телом.

3.2 Классификация веществ как проводников или изоляторов с помощью тестера цепи

В томе 1 этой книги мы показали, что разность потенциалов, приложенная между концами тела, является важным фактором, влияющим на ее проводящее или изолирующее поведение.[6] Тело, действующее как изолятор когда его концы находятся под небольшой разностью электрических потенциалов (обычно до нескольких десятков вольт), может вести себя как проводник, если эта разность потенциалов выходит за пределы определенного предела. В обычных экспериментах электростатики мы имеем дело с разностями потенциалов, обычно варьирующимися от 1000 вольт до 10 000 вольт (т. е. между 10^3 В и 10^4 В). В этих условиях большинство твердых и жидких веществ ведут себя как проводники. С другой стороны, при низких разностях потенциалов до нескольких десятков вольт, большинство веществ ведут себя как изоляторы. Металлы являются исключением из этого правила, поскольку они ведут себя как отличные проводники как при низких, так и высоких разностях потенциалов. Естественные и синтетические смолы, такие как янтарь и пластмассы в целом, также являются исключениями из этого правила. Они ведут себя как хорошие изоляторы при низких и высоких разностях потенциалов.

В этом разделе описаны некоторые эксперименты с использованием тестера цепи из Рис. 2.19. Мы будем иметь дело с низкими разностями потенциалов. Мы дадим новое определение проводника и изолятора специально для этих условий.

Эксперимент 3.9 - *Замыкание тестера цепи металлической проволокой*

Возьмем четвертый кусок медной проволоки, неизолированный на концах. Один конец этого провода подключен в точке A на Рис. 2.19, а другой – в точке B. Лампочка должна включиться, Рис. 3.10. Этот факт покажет, что электрические контакты выполнены правильно. Более того, этот факт также укажет на то, что электрический ток течет через провода и лампочку. Поскольку лампочка включается, медный провод ведет себя как проводник электричества, когда он находится под разностью потенциалов 1,5 В.

Если лампочку оставить в включенном состоянии в течение нескольких минут, батарея становится слабее. На это указывает интенсивность света, которая уменьшается и, в конечном счете, сходит на нет, т. е. батарея разрядилась. Чтобы предотвратить разрядку, откройте контакт (т. е. удалите четвертый провод, находящийся между A и B) как только загорится лампочка. Затем вы можете использовать одну и ту же батарею для проверки других веществ.

[6] раздел 6.6 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

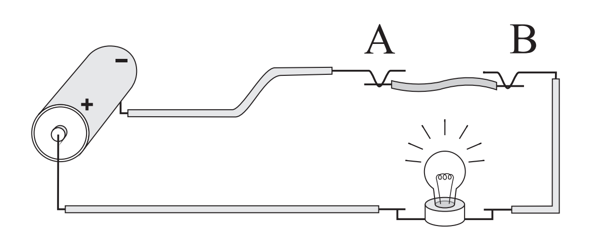


Рис. 3.10: Когда неизолированные концы медного провода подсоединяются к точкам A и B, лампочка включается.

Эксперимент 3.10 - *Закрытие тестера цепи пластиковой соломой или деревянным шампуром*

Соедините точки A и B пластиковой соломой. При этом лампочка не включается. Этот факт указывает на то, что электрический ток не течет по контуру, Рис. 3.11 (a). Лампочка не загорается также при соединении A и B деревянным шампуром, Рис. 3.11 (b).

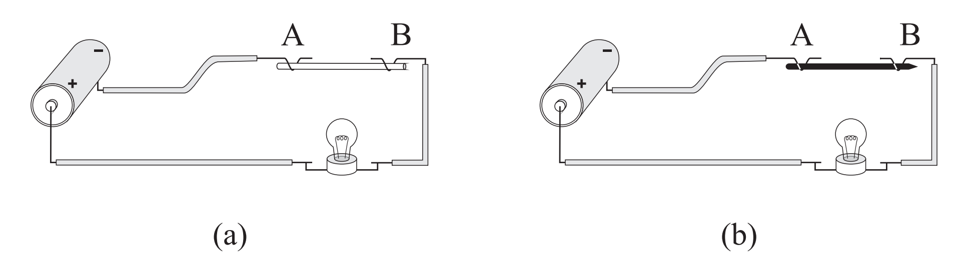


Рис. 3.11: (a) Лампочка не включается при соединении A и B пластиковой соломкой. (b) Лампочка не загорается также при соединении A и B деревянным шампуром.

Поскольку лампа не включается, пластиковая солома и деревянный шампур ведут себя как изоляторы, когда они находятся под разностью потенциалов 1,5 В.

Эксперимент 3.11 - *Замыкание тестера цепи водой*

Лучший способ проверить жидкости – использовать изолирующий сосуд (например, пластиковый стаканчик). Первоначально он должен быть пустой. Чтобы проверить, действительно ли он является изолятором, соедините A и B через этот пустой сосуд. С этого момента будем предполагать, что лампа не включается, что указывает на то, что сосуд ведет себя как изолятор, когда он находится под разностью потенциалов 1,5 В.

Затем пластиковый стакан наполняется пресной водой из крана или дождевой водой. Терминалы A и B затем погружаются в воду. Лампочка не включается, Рис. 3.12. Этот факт указывает на то, что пресная вода

ведет себя как изолятор, когда она находится под разностью потенциалов 1,5 В.

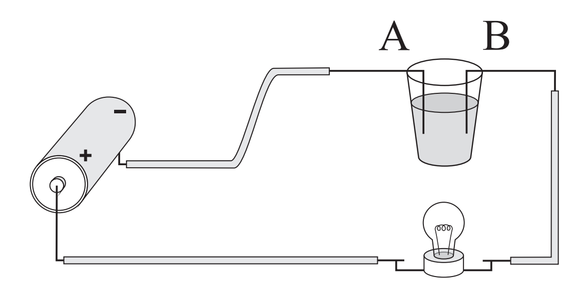


Рис. 3.12: Лампочка не включается, когда A и B замыкаются пресной водой.

3.2.1 Определение проводника и изолятора, когда небольшая разность потенциалов приложена между концами тела

Следуя процедурам экспериментов 3.9 - 3.11 с разными веществами, составим новую классификацию веществ на основе другого определения, пригодного для низких напряжений.

Определение 3.4

Если лампочка на Рис. 2.19 включается, когда определенное вещество соединяет точки A и B, как на Рис. 3.10, это вещество называется *проводником*. Если лампочка не включается, как показано на Рис. 3.11, вещество называется *изолятором*.

Согласно этому определению, медный провод является проводником, когда его концы находятся под разностью потенциалов 1,5 В. С другой стороны, пластиковая солома, деревянный шампур и пресная вода являются изоляторами для этой разности потенциалов. Как заметил Гаспар, графит, соленая вода и лимон также ведут себя как изоляторы для этой разности потенциалов,[7] хотя многие учебники ошибочно утверждают, что лампочка включалась бы при соединении точек A и B рисунка 2.18 через эти вещества.

[7] [Gas03, стр. 252-256].

3.2.2 Тела, которые ведут себя как проводники или изоляторы в обычных экспериментах с постоянным током

Мы проводим несколько тестов, аналогичных экспериментам 3.9 - 3.11. Конечный результат следующий:

- **Вещества, которые ведут себя как проводники, когда их концы находятся под разностью потенциалов 1,5 В:**
  Все металлы.

- **Вещества, которые ведут себя как изоляторы, когда их концы находятся под разностью потенциалов 1,5 В:**
  Сухой воздух, влажный воздух, янтарь, пластик, шелк, дерево, нагретое стекло, стекло при комнатной температуре, нейлон или синтетический полиамид, хлопок, ПВХ, полиэстер, шерсть, человеческие волосы, акриловая трубка, акриловая ткань, пенополистирол, молотый кофе, бумага, тонкий картон, папиросная бумага, кусочек мела, фарфор, пресная вода, соленая вода, лимонад, алкоголь, шампунь, керосин, молоко, безалкогольные напитки, моющее средство, растительное масло, стена, доска, пробка, пшеница мука, кукурузная мука, акриловая нить, соль, сахар, опилки, земля или глина, кирпич, резина и т. д.

Можно предложить несколько вариаций этих экспериментов. Когда у нас нет розетки для лампочки, провода можно припаять непосредственно на клеммы лампочек. То есть неизолированный конец провода соединить с боковой частью винта колбы, а неизолированный конец другого провода припаять к нижнему концу основания винта колбы. Эти два провода также можно просто присоединить к корпусу и кончику винта с помощью клейких лент или рук. Неизолированные концы проводов также можно привести непосредственно в контакт с положительными и отрицательными клеммами батареи, фиксируя их липкими лентами или руками. Иногда батарея поставляется с проводами, соединенными с клеммами батареи, в то время как их свободные концы могут быть подключены к другим проводам или к гнезду лампы. Можно также соединит две батареи на 1,5 В последовательно, что дает разницу потенциалов 3 В между их свободными концами.

Важно заметить, что существует несколько веществ, которые ведут себя как проводники в соответствии с определением 3.3, в то время как они ведут себя как изоляторы согласно определению 3.4. Примеры: пресная вода, деревянный шампур, бумага, некоторые виды стекла при комнатной температуре и т. д. Эти вещества разряжают электризованный электроскоп, когда есть разность потенциалов между электроскопом и землей от 1000 В до 10 000 В. Поэтому они ведут себя как проводники при таких высоких напряжениях. Однако они не допускают электрического тока с интенсивностью, способной включить лампу (т. е. не пропускают через себя поток достаточно большого количества электризованных частиц), когда их концы

находятся под малым напряжением до нескольких десятков вольт. Поэтому эти же вещества ведут себя как изоляторы для этих низких напряжений.

Как упоминалось в томе 1 этой книги, ввиду этого факта, возможно, имеет смысл ввести некоторое изменение в терминологию. Обычно мы говорим, что некоторое тело A *есть* проводник, а другое тело B *есть* изолятор. Однако из того, что было сказано выше, было бы правильнее сказать, что при определенных условиях тело A *ведет себя как* проводник, а в других условиях оно *ведет себя как* изолятор. Эта же терминология былы бы действительна и для тела B. Но применение этой новой терминологии удлинило и усложнило бы все предложения. По этой причине мы будем придерживаться обычной терминологии и говорить, что тела *являются* проводниками или изоляторами. Но следует всегда помнить, что это относительные понятия. Поведение тел зависит не только от их внутренних свойств, но и от внешних условий, которым они подвержены.

3.3 Факторы, влияющие на проводящие и изолирующие свойства вещества

3.3.1 Природа или химический состав вещества

Эксперименты раздела 3.1 показывают, что тела можно разделить на две группы, называемые проводниками и изоляторами. В электростатике высокая разность потенциалов может быть приложена к концам тела. Затем их можно классифицировать с использованием заряженного электроскопа. Прикоснитесь к одному концу картона электроскопа и соедините другой конец с рукой или с землей. Тела, которые разряжают электроскоп, называются проводниками. Примером может служить металлическая проволока. Тела, которые не разряжают электроскоп, называются изоляторами. Примером является пластиковая солома.

Эти эксперименты показывают, что основным аспектом, лежащим в основе этой классификации, является природа тела, то есть его химический состав и внутренняя структура. Большинство тел ведут себя в электростатике как проводники. Примеры: металлы, вода, бумага, тело человека, дерево, многие виды стекла при комнатной температуре, несколько видов резины и т. д. Только небольшое число веществ ведут себя как изоляторы. Примеры: сухой воздух, шелк, растительное масло, янтарь и другие природные смолы, а также пластмассы вообще и другие синтетические смолы.

Эксперименты раздела 3.2 показывают, что требуется другая классификация проводников и изоляторов, когда небольшая разность потенциалов приложена между концами тела. Эта новая классификация может быть получена с использованием тестера цепи на Рис. 2.19. Начните с новой батареи и соедините концы тела между точками A и B тестера цепи. Когда лампочка включается, мы говорим, что тело является проводником. Когда лампа не включается, мы говорим, что тело ведет себя как изолятор.

Эти эксперименты также показывают, что в обычных экспериментах, в

которых постоянный ток может протекать через цепь, основным аспектом, влияющим на классификацию тел, является их природа или химический состав. При низких разностях потенциалов (до нескольких сотен вольт) все металлы ведут себя как проводники. Большинство других веществ ведут себя как изоляторы. Примеры: вода, бумага, человеческое тело, дерево, большинство стекол при комнатной температуре, несколько видов каучука, сухой и влажный воздух, шелк, растительное масло, янтарь и другие природные смолы вместе с пластмассами вообще и другими синтетическими смолами.

3.3.2 Разность потенциалов между концами тела

Как было показано в разделах 3.1 и 3.2, помимо внутренне присущих телу свойств, есть другое фундаментальное свойство для классификации любых веществом в качестве проводника или изолятора, а именно, внешняя разность потенциалов, приложенная между концами тела. Металлы ведут себя как проводники как при низких, так и при высоких разностях потенциалов. Другие вещества ведут себя как изоляторы при низких и высоких разностях потенциалов: сухой воздух, шелк, растительное масло, янтарь и другие природные смолы, а также пластмасс вообще и другие синтетические смолы.

С другой стороны, есть несколько веществ, которые ведут себя как проводники в обычных экспериментах электростатики (где мы имеем дело с большими разностями потенциалов), но ведут себя как изоляторы в обычных экспериментах, связанных с возможнью существования постоянного электрического тока (с низкой разностью потенциалов). Вот небольшой перечень таких веществ: влажный воздух, вода, бумага, человеческое тело, дерево, много видов стекла при комнатной температуре и несколько видов резины. В подразделах 3.1.2 и 3.2.2 представлены соответствующие классификации для каждого случая.

3.3.3 Время, необходимое для разрядки электризованного тела

Эксперимент 3.12 - *Электроскоп, покоящийся на столе, с течением времени разряжается*

Зарядите электроскоп, как в эксперименте 3.1, Рис. 3.1. Для этого надо поскрести соломой по картону электроскопа. Оставьте заряженный электроскоп на столе в сухую погоду. Обратите внимание, что полоса остается в поднятом состоянии в течение нескольких секунд или даже в течение нескольких минут. Однако, если мы подождем достаточно долго – например, один час – электроскоп полностью разрядится.

Это явление подразумевает, что определение 3.3 проводника и изолятора, как дано в подразделе 3.1.1, зависит от времени наблюдения. В течение нескольких секунд сухой воздух можно считать хорошим изолятором. С

другой стороны, для интервала в один час сухой воздух можно классифицировать как проводник, так как электроскоп разряжается за это время.

Это различие можно уточнить с помощью более точных определений, связанных с экспериментальными процедурами, описанными в разделе 3.1.

Определение 3.5

Для целей этой книги *хорошие проводники* – вещества, которые разряжают электризованный электроскоп, когда они вступают в контакт с ним менее 5 секунд. *Плохие проводники*, или *плохие изоляторы* – вещества, которые занимают от 5 до 20 или 30 секунд, чтобы разрядить электроскоп. Эти тела также называются *несовершенными проводниками* или *несовершенными изоляторами*. Наконец, *хорошие изоляторы* - вещества, для которых требуется более 20 или 30 секунд, чтобы разрядить электризованный электроскоп. В этой книге мы обычно будем называть хорошие проводники просто проводниками, а хорошие изоляторы – просто изоляторами.

3.3.4 Длина тела

Эксперименты этого подраздела и подраздела 3.3.5 должны выполняться только в сухие дни. В этом случае электроскоп, заряженный как в эксперименте 3.1, Рис. 3.1, остается электризованным в течение интервала времени не менее 30 секунд. С другой стороны, в мокрую и дождливую погоду электроскоп быстро разряжается в окружающий воздух вскоре после того, как его зарядили (например, соскабливанием его картона потертой соломой или пластиковой линейкой). В такие дождливые дни результаты экспериментов этого подраздела и подраздела 3.3.5 не будут вполне определенными. Поэтому лучше избегать выполнение этих экспериментов во влажную погоду.

В этом разделе мы рассмотрим влияние длины предмета, который приводится в контакт с заряженным электроскопом, в отношении его проводящих или изолирующих свойств.

Эксперимент 3.13 - *Разрядка электроскопа касанием его полосками бумаги*

Вырежьте несколько полосок бумаги (например, размера $A4$), шириной 2 см и длиной от 10 см до 1 м. Для получения полоски длиной 1 м, концы коротких полос можно соединить клеем или скрепками. Зарядите электроскоп и оставьте его на столе в сухой день. Держите один конец 10-сантиметровой полосы рукой и коснитесь ее свободным концом края тонкого картона электроскопа.[8] Электроскоп разряжается за 1 - 3 секунды, Рис. 3.13 (b) и (c). Следовательно, согласно определению 3.5 подраздела 3.3.3 эту полосу можно считать хорошим проводником.

[8]раздел 6.7 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

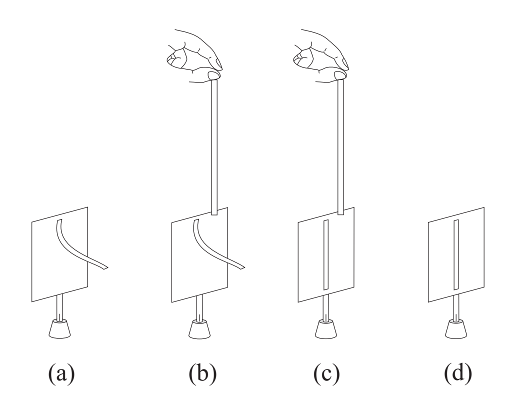


Рис. 3.13: (a) Заряженный электроскоп. (b) и (c): Полоска бумаги, удерживаемая рукой, быстро разряжает электроскоп, когда ее свободный конец касается тонкого картона. (d) Удаление полосы бумаги оставляет электроскоп разряженным.

Снова зарядите электроскоп и на этот раз используйте бумажную полоску 30×2 см. Держите один конец бумажной ленты рукой, а ее свободным концом каснитесь картона электроскопа. Для разрядки электроскопа требуется интервал времени от 4 до 6 секунд. В зависимости от типа бумаги эту полосу бумаги длиной 30 см можно считать плохим проводником.

Этот эксперимент ясно показывает также, что количество заряда, теряемого электризованным электроскопом, увеличивается с течением времени, см. подраздел 3.3.3. Разница состоит только в том, что в рассматриваемой ситуации электроскоп разряжается главным образом через бумажную ленту, а не через окружающий воздух.

Электроскоп заряжается еще раз и эксперимент повторяется с лентой длиной 1 м и шириной 2 см. Обратите внимание, что электроскоп остается заряженным в течение примерно 10 секунд. Когда воздух очень сухой, интервал времени разряда может увеличиться до 20 или 30 секунд в зависимости от типа бумаги. По определению 3.5 подраздела 3.3.3, мы заключаем, что эту полосу длиной 1 м можно считать хорошим изолятором.

Этот эксперимент показывает, что длина тела влияет на его поведение в качестве проводника или изолятора. Увеличивая длину тела между рукой и картоном электроскопа, мы увеличиваем интервал времени, необходимый для разрядки электроскопа.

Эксперимент 3.14 - *Разрядка электроскопа через швейные нитки*

Эксперимент 3.13 можно повторить с другими материалами. Есть несколько интересных веществ, которые четко показывают влияние длины тела на интервал времени, необходимый для разряда электроскопа: бумага, картон, хлопковая нить или шпагат, швейная нить и т. д. В таблице 3.1 представлены интервалы времени, необходимые для разрядки электроскопа с бумаж-

ными полосками шириной 2 см и швейной нитью; измерения проводились, следуя схеме эксперимента 3.13.

Вещество \ Длина	10 см	30 см	1 м
бумажная полоса	1-3 с	4-6 с	10-30 с
швейная нить	2 с	3 с	6 с

Таблица 3.1: Приблизительные интервалы времени, необходимые для разрядки электроскопа.

Численные значения этой таблицы и других таблиц в этой книге следует рассматривать только качественно. Значения, сильно отличающиеся от представленных здесь, могут быть получены в зависимости от величины электризации электроскопа, его размера, погодных условий дня, в течение которого проводится эксперимент, а также от качества или химического состава тестируемых материалов и т. д. Эти числа указывают только на качественное поведение факторов, влияющих на проводящие или изолирующие свойства тела.

Эксперимент 3.15 - *Прикосновение к заряженному электроскопу другими веществами*

Проведите аналогичный эксперимент, используя вместо бумажной полоски пластиковую соломку. Длина обычной соломы 20 см. Разрезав несколько таких солом и соединив концы отрезков, можно приготовить соломки разной длины: 10 см, 30 см или 1 м. Держите один конец соломы рукой, а ее свободным концом коснитесь картона заряженного электроскопа. Обратите внимание на то, что электроскоп остается заряженным более 20 или 30 секунд в сухой день. Мы заключаем, что соломки разной длины можно рассматривать как хорошие изоляторы. Мы не рассматриваем в этом случае влияние длины на время разрядки, поскольку электроскоп остается заряженным даже в случае короткой пластиковой соломы длиной 10 см.

Противоположное поведение имеет место, когда полоски из алюминиевой фольги шириной 2 см касаются картона заряженного электроскопа. То есть, он почти мгновенно разряжается для полос с длиной от 10 см до 1 м. Во всех этих случаях полосу алюминиевой фольги можно считать хорошим проводником. Снова мы не рассматриваем влияние длины полоски на время разряда. В конце концов, даже для полосы длиной 1 м разряд электроскопа происходит настолько быстро, что его нельзя измерить обычными наручными часами.

Эксперимент 3.16 - *Зарядка двух электроскопов, соединенных бумажными полосками*

В аналогичном эксперименте используются два электроскопа, соединенных полосками или нитями из разных материалов, а именно: бумага, картон, алюминиевая фольга, пластмассовые соломки, шпагат или швейная

нить.[9] Эти материалы можно закрепить на картонах электроскопов с помощью скрепки для бумаг, Рис. 3.14.

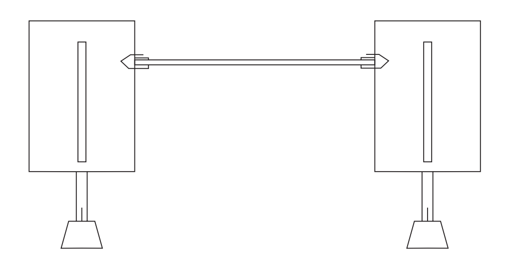


Рис. 3.14: Два электроскопа, соединенных бумажной полосой.

Соедините два электроскопа полоской бумаги шириной 2 см и длиной 10 см. Электроскопы изначально незаряжены. Электризуйте акриловую линейку или пластиковую солому путем трения о волосы или бумажную салфетку. Несколько раз проведите потертой соломой по верхнему краю одного из электроскопов, пока он не зарядится, т. е. до тех пор, пока ее полоска из папиросной бумаги не поднимется. Попробуйте измерить интервал времени, необходимый для зарядки второго электроскопа. Конечно, такое измерение будет весьма ненадежным. Действительно, второй электроскоп начинает заряжаться не в конце процедуры зарядки первого электроскопа, но начиная с того момента, когда мы в первый раз провели соломой по картону первого электроскопа. Иногда необходимо несколько раз пощелкать по соломке второго электроскопа, чтобы освободить его полоску тонкой бумаги и дать ей возможность подниматься.

Эксперимент 3.17 - *Разрядка двух электроскопов, соединенных бумажными полосками*

Более надежное измерение интервала времени может быть получено с использованием обоих электроскопов эксперимента 3.16. Для этого подождите, пока оба электроскопа, соединенных бумажной полосой, не будут электризованы. Прикоснитесь к верхнему картону одного электроскопа пальцем. Его полоска немедленно падает. Удерживая палец на первом электроскопе, измерьте временной интервал, необходимый для разрядки второго электроскопа. Когда электроскопы соединены полоской шириной 2 см и длиной 10 см, требуемый интервал времени составляет 2 - 3 секунды.

Повторите этот эксперимент с бумажными полосками шириной 2 см и разной длины в диапазоне от 10 см до 1 м. Эту же процедуру можно использовать, когда электроскопы соединены швейной нитью длиной 10 см, 30 см и 1 м. Таблица 3.2 дает типичный результат подобного эксперимента с использованием различных материалов.

Соедините два электроскопа пластмассовыми соломками длиной 10 см, 30 см или 1 м. Электризуйте оба электроскопа одинаково, проведя несколь-

[9] [FM91, стр. 43-45], [Ferc, стр. 70] и [FR08, стр. 18].

Вещество \ Длина	10 см	30 см	1 м
бумажная полоска	2-3 с	5 с	20-25 с
швейная нить	2 с	4 с	15-20 с

Таблица 3.2: Приблизительные интервалы времени, необходимые для разрядки одного из заряженных электроскопов после заземления другого электроскопа.

ко раз потертыми соломками по их картонам. Полоски электроскопов должны быть подняты на одинаковую высоту в начале этого эксперимента. Прикоснитесь к картону первого электроскопа пальцем, заметив что его полоска сразу падает. С другой стороны, второй электроскоп остается электризованным в течение более 20 или 30 секунд в сухую погоду, независимо от длины пластиковой соломы, соединяющей электроскопы.

Соедините два электроскопа полосками из алюминиевой фольги шириной 2 см и разной длины, а именно, 10 см, 30 см и 1 м. Электризуйте систему так, чтобы обе полосы приняли одинаково приподнятое положение. Когда палец касается картона первого электроскопа, его полоска из немедленно падает. То же самое происходит с полосой второго электроскопа, независимо от длины полосы алюминиевой фольги, соединяющей электроскопы.

В этих двух последних примерах мы не можем обнаружить влияние длины тела, соединяющего два электроскопа, в отношении интервала времени для разрядки второго электроскопа. Когда они связаны пластиковой соломой, этот интервал очень большой, независимо от длины соломы. То есть второй электроскоп остается заряженным после заземления первого электроскопа. С другой стороны, когда они соединены полосой из алюминиевой фольги, этот интервал времени равен нулю, независимо от длины полосы. То есть оба электроскопа разряжаются почти мгновенно, когда один из них заземлен. Временной интервал, необходимый для разрядки второго электроскопа в этом случае, настолько мал, что его нельзя измерить простыми наручными часами, независимо от длины полосы алюминиевой фольги, соединяющей электроскопы.

Рассмотрим теперь ситуацию, когда в предыдущих экспериментах интервал времени, необходимый для разрядки второго электроскопа, составляет от 1 секунды до 2 минут. Эти эксперименты показывают, что чем больше длина тела, соединяющего два электроскопа, тем медленнее разряжается второй электроскоп после заземления первого электроскопа.

3.3.5 Площадь поперечного сечения тела

В этом подразделе рассматривается влияние площади поперечного сечения тела, которое входит в контакт с заряженным электроскопом в отношении его проводящих или изолирующих свойств.

Эксперимент 3.18 - *Разрядка электроскопа через волосы*

Зарядите электроскоп и поместите его на стол. Держите один конец человеческого волоса рукой и коснитесь другим концом волоса картон заряженного электроскопа, как на Рис. 3.13. Обратите внимание, что электроскоп остается заряженным в течение нескольких секунд. Это указывает на то, что отдельный человеческий волос можно классифицировать как хороший изолятор.

Зарядите электроскоп еще раз и увеличьте количество волос, удерживаемых рукой. Коснитесь их свободными концами одновременно картон заряженного электроскопа. Обратите внимание, что с увеличением числа волос, разрядка происходит быстрее. Например, с десятками волос электроскоп разряжается через несколько секунд. Такое количество волос можно классифицировать как хороший проводник.

Эксперимент 3.19 - *Разрядка электроскопа касанием бумажных полосок*

Повторите эксперимент 3.13, используя тела с фиксированной длиной, но изменяя площадь их поперечного сечения. Измените, например, ширину полосок бумаги, которые будут соприкасаться с электроскопом. В таблице 3.3 показан результат такого эксперимента с двумя полосками одинаковой длины, 1 м, и различной ширины, 0,5 и 2 см.

Ширина бумажной полоски	0.5 см	2 см
Время разрядки	50 с	10 с

Таблица 3.3: Приблизительное время разрядки электроскопа.

Эксперимент 3.20 - *Разрядка электроскопа через хлопчатобумажные нити*

Повторите эксперимент 3.13 с использованием хлопчатобумажных нитей или шпагатов фиксированной длины, но меняя площадь их поперечного сечения. Держите один конец нити, коснитесь другим концом картон заряженного электроскопа и измерьте время разрядки. Таблица 3.4 показывает результат этого эксперимента с тонкой хлопчатобумажной нитью и более толстой хлопковой нитью, или шпагатом длиной 1 м.

Хлопок	швейная нить	шпагат
Время разрядки	6 с	6-7 с

Таблица 3.4: Приблизительное время разрядки электроскопа.

Эксперимент 3.21 - *Разрядка двух электроскопов, соединенных бумажной полоской*

Повторите эксперимент 3.16, соединяя два электроскопа бумажными полосками одинаковой длины, но разной ширины или разной площади поперечного сечения. Таблица 3.5 сравнивает временные интервалы, необходимые для разрядки электроскопа 2 после того, как электроскоп 1 был заземлен касанием его картона пальцем. Соединяющие полоски имели длину 1 м.

Ширина бумажной полоски	0.5 см	2 см
Время разрядки	60 с	20-25 с

Таблица 3.5: Приблизительное время разрядки одного из электроскопов при заземлении другого электроскопа.

Эксперимент 3.22 - *Разрядка двух электроскопов хлопковой нитью*

Повторите эксперимент 3.16, соединяя два электроскопа хлопчатобумажными нитями одинаковой длины, но с разной шириной или с разными сечениями. Таблица 3.5 сравнивает временные интервалы, необходимые для разрядки электроскопа 2 после того, как электроскоп 1 был заземлен касанием его картона пальцем. Длина нитей – 1 м.

Хлопок	швейная нить	шпагат
Время разрядки	15-20 с	6-7 с

Таблица 3.6: Приблизительное время разрядки одного из электроскопов при заземлении другого электроскопа.

Эксперимент 3.23 - *Разрядка электроскопа касанием нескольких бумажных полосок*

Вместо того, чтобы менять ширину бумажных полос, используйте разное количество полос одинаковой ширины. Выполните, например, эксперимент с бумажными полосками длиной 1 м и шириной 0,5 см. Зарядите электроскоп, держите конец этой полосы, как показано на Рис. 3.13, соедините ее свободный конец с картоном электрода и измерьте время разрядки.

В другом эксперименте мы соединяем три одинаковые бумажные полоски скрепкой на каждом конце. Держите один из скрепок рукой, прикоснитесь другой скрепкой к картону заряженного электроскопа и измерьте время разряда. Таблица 3.7 сравнивает результаты этой процедуры.

Эксперимент 3.24 - *Разрядка электроскопа касанием нескольких хлопковых нитей*

Число бумажных полосок	1	3
Время разрядки	50 с	3 с

Таблица 3.7: Приблизительное время разрядки электроскопа.

Число швейных нитей	1	3
Время разрядки	6 с	2-3 с

Таблица 3.8: Приблизительное время разрядки электроскопа.

Вместо того, чтобы менять площади поперечного сечения хлопчатобумажных нитей, используйте несколько хлопчатобумажных нитей одного и того же сечения. Таблица 3.8 сравнивает результаты этой процедуры.

Эксперимент 3.25 - *Разрядка двух электроскопов, соединенных несколькими бумажными скрепками*

В следующем испытании соедините два электроскопа, как в эксперименте 3.16. Измерьте время разрядки одного из электроскопов, когда другой заземлен. Во всех этих экспериментах мы используем бумажные полоски одинаковой длины и ширины. Первоначально электроскопы соединены одной бумажной полоской, и мы измеряем время разрядки.

В следующем эксперименте соедините два электроскопа тремя бумажными полосками и еще раз измерьте время разрядки. В таблице 3.9 представлены результаты эксперимента с использованием полосок длиной 1 м шириной 0,5 см.

Количество бумажных полосок	1	3
Время разрядки	60 с	15 с

Таблица 3.9: Приблизительное время разрядки одного из электроскопов после заземления другого электроскопа.

Эксперимент 3.26 - *Разрядка двух электроскопов, соединенных несколькими хлопковыми нитями*

В очередном испытании соедините два электроскопа, как в эксперименте 3.16. Измерьте время разрядки одного электроскопа, когда другой заземлен. Мы используем здесь швейные хлопчатобумажные нити одинаковой длины из одной и той же катушки. Первоначально электроскопы соединены одной хлопчатобумажной нитью.

В следующем эксперименте соедините два электроскопа тремя швейными нитками и еще раз измерьте время разрядки. В таблице 3.10 представлены результаты этого эксперимента с использованием хлопчатобумажных нитей длиной 1 м из одной и той же катушки.

Количество швейных нитей	1	3
Время разрядки	15-20 с	16-18 с

Таблица 3.10: Приблизительное время разрядки одного из электроскопов после заземления другого электроскопа.

———————————————————————————————————

Эти эксперименты показывают, что площадь поперечного сечения тела оказывает влияние на его проводящие и изоляционные свойства. Чем больше эта область между рукой и картоном электроскопа, тем меньше время разрядки электроскопа. Аналогично, чем больше площадь тела, соединяющего два электроскопа, тем меньше будет время разрядки одного из электроскопов после заземления другого.

Здесь мы даем некоторые определения с учетом этих фактов.

Определение 3.6

Поток электризованных частиц через поперечное сечение тела называется *электрическим током.* Он пропорционален количеству заряда, проходящему через поперечное сечение проводника в единицу времени.

Примером может служить электрический ток, протекающий через бумажную полоску или через швейную нить в этих экспериментах.

Этот поток электризованных частиц зависит от материала проводника. Например, полоса из алюминиевой фольги проводит лучше, чем обычная полоса бумаги той же длины, ширины и толщины. И эти два материала проводят намного лучше, чем пластиковая полоска того же размера. Предположим, что мы хотим разрядить электризованный электроскоп. Держите одну полоску в руке и коснитесь ее свободным концом картон электроскопа. Количество заряда, которое нужно разрядить, всегда одинаково и равно начальной электризации электроскопа. Время разрядки через алюминиевую фольгу меньше времени разрядки через полоску бумаги. И этот последний интервал времени гораздо меньше интервала времени, необходимого для разрядки того же самого электроскопа через пластиковую полоску.

Рассмотрим теперь проводники из одного и того же материала. При прочих равных начальных условиях, электрический ток, протекающий через тело, будет зависеть от длины проводника. Увеличивая длину тела между рукой и картоном электроскопа, мы увеличиваем временной интервал, необходимый для разрядки электроскопа. Аналогично, чем больше длина тела, соединяющего два заряженных электроскопа, тем длиннее будет временной интервал, необходимый для разрядки одного из электроскопов после заземления другого электроскопа.

Этот электрический ток также зависит от площади поперечного сечения проводника, при одних и тех же начальные условиях. Чем больше эта площадь, тем меньше будет временной интервал, необходимый для разрядки. Аналогично, чем больше поперечное сечение тела, соединяющего два заряженных электроскопа, тем меньше будет промежуток времени, необходимый для разряда одного из электроскопов после заземления другого.

Определение 3.7

Мы говорим, что тело, соединяющее два электроскопа в этих экспериментах, имеет *электрическое сопротивление*. В любой момент это сопротивление пропорционально разности потенциалов между двумя электроскопами и обратно пропорционально электрическому току, проходящему через тело.

Предположим, что начальные условия одни и те же. Например, два заряженных электроскопа, соединенных бумажной лентой или швейной нитью. Заземлите один из электроскопов, коснувшись его картона пальцем, и измерьте время разрядки другого электроскопа. Чем дольше этот интервал времени, тем больше будет сопротивление соединяющего их тела. Это означает, что сопротивление тела обратно пропорционально протекающему через него электрическому току при фиксированной разности потенциалов между его концами. Согласно предыдущим экспериментам, сопротивление тела увеличивается с длиной тела, уменьшается с площадью его поперечного сечения; оно зависит также от материала, т. е. химического состава тела.

Эксперимент 3.27 - *Сравнение интервалов времени для разрядки*

Интересно также сравнить временные интервалы для разрядки представленных на рисунках 3.13 и 3.14 электроскопов. В первом случае у нас один заряженный электроскоп. Держите полосу или нить в руке и коснитесь ее свободным концом картон электроскопа, измеряя при этом время его разрядки. Во втором случае мы имеем два заряженных электроскопа, соединенных полосой или нитью. Заземлите один из электроскопов, прикоснувшись к нему рукой, и измерьте время разрядки второго электроскопа. Предположим, что одно и то же тело используется для разрядки электроскопов в этих двух случаях. Это может быть, например, полоса бумаги с одинаковой длиной и шириной в обоих случаях. Заметим, что время разрядки в первом случае обычно меньше времени разрядки во втором случае.

Эту разницу во времени можно объяснить следующим образом. Во втором случае у нас был не только электризованный электроскоп, но и электризованное тело, соединяющее электроскопы, а именно, бумажная полоска или хлопковая нить. Поэтому, когда палец касается первого электроскопа, нам нужно разрядить не только второй электроскоп, но и это соединяющее

тело. В первом случае, с другой стороны, нет необходимости разряжать бумажную ленту или хлопковую нить. Действительно, эти соединяющие тела уже были разряжены, поскольку мы держали их в руке.

Мы можем показать, что бумажная полоса (или хлопковая нить), соединяющая два заряженных электроскопа на Рис. 3.14, была также электризована. Для этого поместите металлический версориум рядом с полосой или нитью в одной и той же горизонтальной плоскости в любом месте по длине полосы или нити. Вначале, когда электроскопы еще не заряжены, версориум будет указывать в произвольном направлении. Проведите несколько раз электризованной акриловой линейкой по картону одного из электроскопов. Подождите, пока оба электроскопа не будут одинаково заряжены. Обратите внимание, что версориум указывает теперь на полосу. Этот факт свидетельствует, что полоса теперь электризована. То же самое происходит с соединительной хлопковой нитью.

Эксперимент 3.28 - *Поочередняя разрядка двух электроскопов*

Еще один интересный эксперимент можно провести с двумя электроскопами на Рис. 3.14. Предположим, что полоса длиной 1 м и шириной 0,5 см соединяет электроскопы. Предположим также, что оба электроскопа одинаково электризованы в начале этого эксперимента. В этом случае, когда палец касается картона электроскопа 1, его полоска немедленно падает. С другой стороны, полоска электроскопа 2 занимает около 60 секунд, чтобы полностью упасть.

Повторите этот эксперимент. Но теперь удалите палец с первого электроскопа через 5 секунд после касания. Его полоска, которая полностью упала, начинает снова подниматься. В то время как полоска 1 поднимается, полоска электроскопа 2 немного падает. Через некоторое время обе полоски отходят от картона на одинаковый угол. Прикоснитесь пальцем к картону второго электроскопа и удалите палец через 5 секунд. Только что описанное поведение полосок повторяется каждый раз, но в противоположных электроскопах. Повторите эту процедуру несколько раз, касаясь каждый раз другого электроскопа, когда полосы электроскопов достигнут нового равновесия. Постепенно вся система разряжается.

Эксперимент 3.29 - *Поочередняя зарядка двух электроскопов*

Любопытно провести эксперимент, где мы начинаем с разряженных электроскопов. Пусть они соединены длинной полоской бумаги небольшой ширины. Проведите один или два раза электризованную акриловую линейку по картону электроскопа 1, заметив, что его полоска поднимается почти сразу. С другой стороны, полоска электроскопа 2 поднимается очень медленно.

После достижения равновесия, проведите электризованной линейкой по картону электроскопа 2. Его полоска поднимается еще больше, и на этот раз тоже почти мгновенно. С другой стороны, полоска электроскопа 1 требует значительного интервала времени, чтобы подняться на уровень полоски электроскопа 2.

3.3.6 Влажность

Влажность соединяющего тела

Эксперимент 3.30 - *Заземление электроскопа с помощью тел различной влажности*

Повторите эксперименты раздела 3.1 и подраздела 3.3.4, изменяя влажность тела, связанного с заряженным электроскопом на Рис. 3.13. Во всех случаях касание электроскопа будет осуществляться полосками шириной 30 см и шириной 0,5 см из одного и того же листа бумаги. Держите полосу рукой за верхний конец. Измерьте время разрядки электроскопа с момента, когда нижний конец полоски коснется его картона. В этом эксперименте мы изменяем только степень влажности бумажных полос. Начните с сухой полоски.

Затем используйте влажную полоску (намочите ее по всей ее длине, с обеих сторон, с помощью распылителя воды). Эксперименты показывают, что чем суше полоса бумаги, тем больше времени занимает разрядка. Таким образом, чем суше бумага, тем лучше она изолирует.

Разница в поведении полосы бумаги, очевидно, связано с количеством влаги в бумаге. Если сравнить проводимости двух столбиков одинаковой длины и площади поперечного сечения – один из пресной воды, а другой из обычной бумаги – мы обнаружим, что вода является гораздо лучшим проводником, чем бумага. То есть она быстрее разряжает электризованный электроскоп. Поэтому, при пропитании водой, бумажная полоса начинает проводить лучше, чем сухая бумага.

Следует заметить, что вода поглощается по всему поперечному сечению полосы, а не только вдоль ее поверхности.

Влажность воздуха

Электростатические эксперименты обычно хорошо работают в сухую погоду, что дает видимые и ощутимые эффекты. Влажность воздуха препятствует накоплению электрических зарядов, уменьшая размер или величину наблюдаемых эффектов.

Эксперимент 3.31 - *Электроскоп, покоящийся на столе в сухой день*

Электроскоп легко зарядить в сухой день. Потрите пластмассовую соломку в волосах. Поскребите потертой соломой поверх тонкого картона электроскопа, как описано в эксперименте 3.1, Рис. 3.1. Электроскоп остается заряженным в течение нескольких секунд или в течение нескольких минут после этой процедуры, Рис. 3.1 (c). Это означает, что сухой воздух является хорошим изолятором, согласно определению 3.5 из подраздела 3.3.3.

Эксперимент 3.32 - *Электроскоп, покоящийся на столе в влажную погоду*

Повторите эксперимент 3.31 в влажный и дождливый день. Когда мы царапаем потертой соломой по картону электроскопа, его полоса поднимается, как на Рис. 3.15 (b).

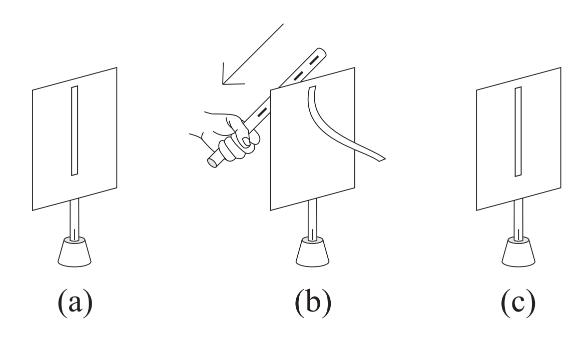


Рис. 3.15: (a) Электроскоп с опущенной полоской. (b) При царапании верхнего края прямоугольника потертой соломой, полоска поднимается. (c) При удалении соломы, полоса падает почти сразу в дождливый день.

Удалите потертую солому. После этого полоска падает сразу, Рис. 3.15 (c). Чем выше влажность воздуха, тем быстрее будет разрядка электроскопа. В зависимости от значения влажности, воздух может вести себя как плохой или хороший проводник. Наличие водяного пара во влажном воздухе является одной из причин, по которым он ведет себя как проводник из-за того, что сама вода является хорошим проводником для обычных экспериментов электростатики.[10] Заряженная поверхность может привлекать молекулы воды или капли, которые при контакте заряжаются и затем отталкиваются поверхностью. См. механизм ПКО, описанный в разделе 4.4. Этот процесс может разрядить поверхность.

Во влажную погоду электроскоп ведет себя иначе, чем в сухие дни. Например, его труднее зарядить. Кроме того, заряженный электроскоп легче разряжается во влажную погоду. Существует два основных фактора, влияющих на поведение электроскопов, фактор I и фактор II. Электроскоп окружен воздухом и соединен с землей через пластиковую соломку, которая поддерживает картон. Он может разрядиться через окружающий воздух (фактор I) или через поддерживающую пластиковую солому (фактор II). В разделе 3.1 показано, что свежая и дождевая вода ведут себя как хорошие проводники для электростатических экспериментов. Фактор I: Влажность воздуха увеличивает проводимость атмосферы. Поэтому электризованный электроскоп может легко потерять заряд в окружающую среду. Фактор II: Водяной пар также может конденсироваться на поверхности любого материала, связанного с землей и поддерживающего картон электроскопа, как пластиковая солома в нашем случае. Эта накопленная на поверхности соломы влажность может заставить ее вести себя как проводник, облегчая утечку электризованных частиц в землю. Этот эффект особенно важен для

[10] разделы 7.11 и 7.13 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

гидрофильных материалов.

3.3.7 Ориентация тела относительно приложенного напряжения

Существуют некоторые материалы, электрическое сопротивление которых изменяется в зависимости от направления или ориентации тела. Графит, например, имеет слоистую структуру. Он обладает низким электрическим сопротивлением вдоль плоскости слоев и высоким в направлении, перпендикулярном этим слоям.

Есть также материалы, которые ведут себя как проводники в одном направлении и как изоляторы в противоположном направлении. То есть они имеют низкое сопротивление потоку зарядов в одном смысле и высокое сопротивление в противоположном смысле. Наиболее распространенным и важным примером такого материала является полупроводниковый диод. Его можно приобрести по низкой цене в магазинах электротоваров (несколько центов за диод). Он имеет множество применений в электронной промышленности, используя его в качестве выпрямителя электрического тока, переключателя и т. д. На Рис. 3.16 (a) показано, как он выглядит, а Рис. 3.16 (b) представляет символ, применяемый для обозначения диода в электрических схемах. Один вывод диода называется анодом, а другой — катодом.

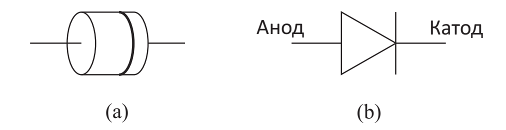


Рис. 3.16: (a) Представление реального диода. (b) Символ для обозначения диода в электрической схеме.

Эксперимент 3.33 - *Полярность диода*

Наблюдайте поведение диода в простой схеме, содержащей небольшую лампочку и розетку, одну или две батарейки на 1,5 В и несколько проводов. При использовании двух батареек их нужно подключить последовательно. Установите тестер цепи, как показано на Рис. 3.17 (a). В этой конфигурации лампочка должна включаться, указывая не только на то, что все электрические соединения работают исправно, но также и на то, что диод в указанной ориентации ведет себя как проводник. Диод здесь подключен с *направленной вперед* ориентацией, когда анод подсоединяется к положительной клемме батареи.

Когда полярность диода меняется на противоположную, как на Рис. 3.17 (b), лампочка не включается. В этой конфигурации анод диода подключается к отрицательной клемме батареи. Диод с *обратной ориентацией* ведет себя как изолятор.

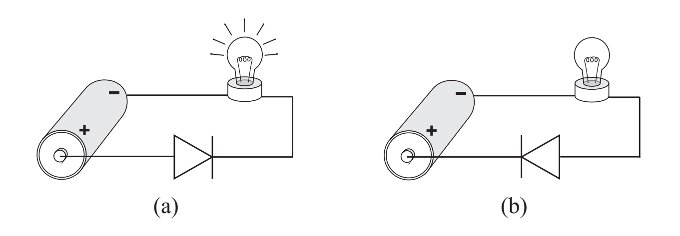


Рис. 3.17: (a) Диод ориентирован вперед и ведет себя как проводник. В этой ориентации возможен поток зарядов. (b) Диод имеет обратную направленность и ведет себя как изолятор. В этой ориентации ток в цепи невозможен.

Такое поведение кажется удивительным. Простое изменение ориентации диода относительно батареи полностью меняет его проводящие свойства. Этот эксперимент показывает, что диод обладает полярностью. Нелегко понять, как возможно такое поведение. Трудно объяснить внутренний механизм работы диода простыми словами. Тем не менее, зная поведение диода в экспериментах, подобных этому, легко использовать его в самых разных приложениях.

Эксперимент 3.34 - *Приложение высокого напряжения к диоду*

Эксперимент 3.33, где использовались диод, батарея, лампочка и несколько кусков провода, показал, что диод может вести себя как проводник или изолятор в зависимости от его ориентации относительно батареи. Это проводящее или изолирующее поведение диода зависит от разности потенциалов, действующих между его концами. В этом эксперименте разность потенциалов на концах диода составляла несколько вольт. С другой стороны, в электростатических экспериментах разность потенциалов как правило находится в пределах от 1000 В до 10 000 В.

В настоящем эксперименте мы анализируем поведение диода в электростатике.

Зарядите электроскоп, Рис. 3.18 (a). Держите диод за его катод в руке и коснитесь анодом картон заряженного электроскопа. Полоска электроскопа сразу падает, Рис. 3.18 (b). Полоска остается в опущенном состоянии после удаления диода, что указывает на то, что электроскоп разрядился.

Электроскоп разряжается и в том случае, когда диод удерживается через его анод, а катод касается картона электроскопа, Рис. 3.19.

В заключение, диод ведет себя как проводник в электростатических экспериментах не только при прямом подключении, но и при обратном. Это еще один пример, показывающий, что проводящие или изолирующие свойства тела зависят не только от природы или химического состава тела, но также от разности потенциалов, приложенной к концам тела, как показано в подразделе 3.3.2.

В этом эксперименте мы не указывали, каким именно зарядом был заряжен электроскоп – положительным или отрицательным. Но это не влияет

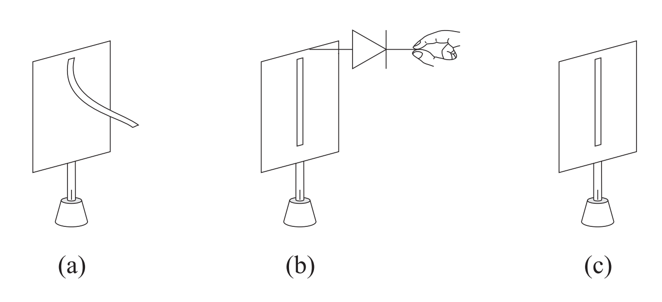


Рис. 3.18: (a) Заряженный электроскоп. (b) Удерживая катод диода в руке, коснитесь анодом картон электроскопа и обратите внимание, что его полоска сразу падает. (c) Полоска остается в висячем положении после удаления диода.

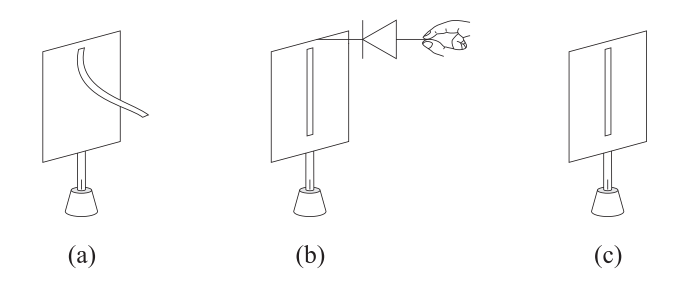


Рис. 3.19: (a) Заряженный электроскоп. (b) Удерживая анод диода в руке, коснитесь катодом картон электроскопа и заметьте, что его полоска сразу падает. (c) Полоска сохраняет вертикальное положение после удаления диода.

на результат эксперимента. То есть, поведение, показанное на Рис. 3.18 и 3.19, имеет место не только для положительно заряженного электроскопа, но и для отрицательно заряженного электроскопа. В этих двух случаях диод ведет себя как проводник, независимо от ориентации его подключения.

Эксперимент 3.35 - *Полярность светодиода*

Существуют некоторые специальные типы диодов, которые излучают свет, так называемые светодиоды. Они бывают разных форм. Рис. 3.20 (a) показывает, как он выглядит, а Рис. 3.20 (b) показывает символ светодиода на принципиальной схеме. Они недороги, и их легко можно приобрести в магазинах электроприборов (несколько центов за светодиод). Напряжение в 1,5 В или 3 В достаточно для их включения.

Они могут заменить лампочки разделов 2.7, 3.2 и подраздела 3.3.2. Однако следует помнить, что они полярны, как и любой другой диод. То есть, когда светодиод включается в цепь с ориентацией вперед, он загорается, как показано на Рис. 3.21. В этой конфигурации положительный вывод батареи подключен к аноду светодиода, а отрицательный вывод батареи подключен к его катоду.

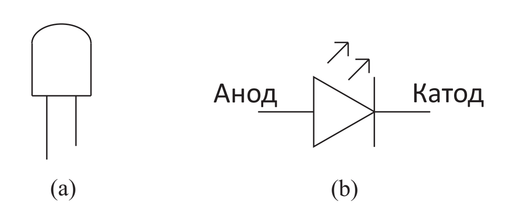


Рис. 3.20: (a) Представление реального светодиода. (b) Символ, используемый в электрических схемах.

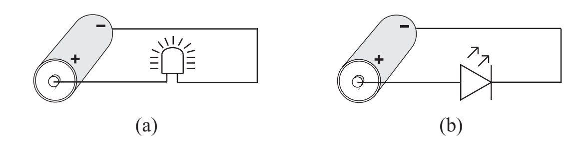


Рис. 3.21: (a) Светодиод загорается при его подключении в прямой поляризации. (b) Светодиод, как он представлен на принципиальной схеме.

Однако, когда светодиод подключен в обратном направлении, он не включается, как показано на Рис. 3.22.

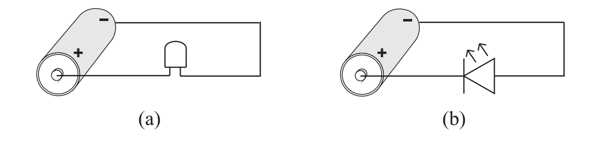


Рис. 3.22: (a) Светодиод в обратной поляризации не включается. (b) Светодиод, как он представлен на принципиальной схеме.

3.3.8 Температура

Электрическое сопротивление многих материалов изменяется в зависимости от их температуры. В случае металлов, например, сопротивление увеличивается с температурой, хотя и не линейно. Некоторые металлы становятся сверхпроводящими (нулевое сопротивление) при достаточно низких температурах.

Электрическое сопротивление изоляторов также изменяется с температурой, хотя их поведение не такое простое, как поведение металлов. Есть изоляторы, где сопротивление уменьшается с увеличением температуры. Как правило, это соотношение носит нелинейный характер.

В общем случае сопротивление полупроводников уменьшается с ростом температуры. Для некоторых материалов зависимость сопротивления от температуры подчиняется экспоненциальному закону.

Существуют материалы, называемые термисторами, сопротивление которых сильно зависит от температуры. В некоторых из них сопротивление

уменьшается по мере повышения температуры, в то время как в других сопротивление возрастает с ростом температуры.

3.3.9 Освещение

Есть некоторые материалы, обычно это полупроводники, сопротивление которых меняется с изменением интенсивности падающего света. Они называются фоторезисторами, светозависимыми резисторами (LDR) или фотоэлементами. Обычно их сопротивление уменьшается с увеличением интенсивности падающего света, представляя эффект фотопроводимости. Они могут вести себя как изоляторы в темноте и как проводники при дневном свете. Они используются как световые датчики для управления освещением, а также в светочувствительных детекторных схемах, схемах переключения света, устройствах сигнализации, пожарных датчиков, измерителей интенсивности света, уличных фонарей, датчиков инфракрасного излучения и т. д.

3.3.10 Другие факторы

Существует несколько других внутренних и внешних факторов, которые могут оказывать влияние на проводящее или изолирующее поведение тела. Примеры: Давление, примеси в материале, процесс его изготовления и т. д. Проводимость воздуха, например, меняется с давлением. Эти дополнительные факторы не будут обсуждаться в этой книге. Но очень важно помнить, что ни один материал не является чистым проводником или чистым изолятором. Любой материал *может вести себя* как проводник или как изолятор. Поведение материала зависит не только от внутренних свойств тела, но и от внешних условий, которым он подвержен. Изменяя эти внутренние и внешние факторы, вы можете изменить проводящие и изолирующие свойства любого материала.

3.4 Законы, относящиеся к электрическим цепям с установившимися токами

В этом разделе кратко изложены некоторые основные законы, касающиеся электрических цепей с постоянными токами.

Луиджи Гальвани (1737-1798) был итальянским ученым и профессором анатомии в Университете Болоньи. Он провел важные исследования, связанные с электричеством животных в 1780-х годах. Он, в частности, заметил, что мышцы ног мертвой лягушки дергались при касании нервов металлическим крюком, и опубликовал свои наблюдения в работе, которая получила широкую известность. Алессандро Вольта (1745-1827) проявил большой интерес к изучению этом вопроса. Первоначально он принял идеи Гальвани об электричестве животных, но позже полностью отказался от

этой концепции. Согласно Вольта, суть этого эффекта заключалась в действии, которое биметаллический крюк оказывал на нервы лягушки. В ходе этого спора он построил свою знаменитую электрическую стопку, где-то между 1795 и 1799 годами. В 1800 году он опубликовал свои открытия в очень важной статье, которая была переведена на многие языки.[11] С этого момента у ученых появился контролируемый источник постоянного тока, связанного с источником низкого напряжения.

Работая с аккумуляторной батареей, Х. К. Эрстед (1777-1851) обнаружил в 1820 году отклонение намагниченной иглы вблизи длинной проволоки, несущей постоянный ток. Его короткая статья в четыре страницы, описывающая это открытие, оказала большое влияние на многих ученых, и она была переведена на многие языки.[12] Следуя этим исследованиям, Томас Йоханн Зеебек (1770-1831) обнаружил термоэлектрический эффект в 1821 году. В частности, он заметил, что стрелка компаса отклоняется замкнутой петлей, образованной двумя разными металлами, соединенными в двух местах, всякий раз, когда есть разница температур между соединениями. Этот факт указывал на существование потока электрических зарядов вокруг кольца.

Хамфри Дэви (1778-1829) был английским химиком, который также работал с электричеством. В 1821 году он обнаружил, что проводящая сила металлической проволоки, соединенной с выводами вольтовой батареи, обратно пропорциональна ее длине, прямо пропорциональна площади ее сечения, и не зависит от формы этого поперечного сечения. Затем он пришел к выводу, что постоянный ток течет не только вдоль поверхности металла, но и по всему его поперечному сечению . Между 1823 и 1826 годами Антуан Сезар Беккерель (1788-1878) подтвердил эти результаты с помощью независимых исследований.

Георг Симон Ом (1789-1854) был немецким ученым, на которого открытия Вольта, Эрстеда и Зеебека оказали сильное влияние. Между 1825 и 1827 годами он провел важные эксперименты, связанные с электрическими цепями, несущими постоянные токи. Сначала он работал с вольтовой батареей. Тогдашние батареи не обладали стабильностью и быстро теряли мощность с последующим снижением разности потенциалов между их терминалами. Затем он решил использовать термоэлектрическую пару в качестве источника постоянного напряжения. Преимущество этого источника по сравнению с ранними батареями состояло в том, что, когда два контакта его источника поддерживались при постоянной температуре, он мог получить разность напряжений, которая оставалась постоянной в течение всего времени проводедения его экспериментов. Он также исследовал проводимость различных металлов. Он изучал ток в цепи как функцию состава проводов, соединявших выводы источника напряжения. Он также проанализировал зависимость тока от длины металлического провода, площади его поперечного сечения и разности «электроскопической силы»

[11] [Vol00a], [Vol00b], [Vol64] , [Mag06] и [MA08].
[12] [Oer20b], [Oer20a], [Oer65], [Fra81] и [Ørs86].

между концами провода. Он увязал эту электроскопическую силу (выражение, придуманное им) с объемной плотностью заряда. Только в 1849 г. Г. Кирхгоф (1824-1887) правильно идентифицировал электроскопическую силу Ома с понятием электростатического потенциала. Эти исследования привели к тому, что теперь называется законом Ома в учебниках.[13] Согласно этому закону, разность потенциалов, приложенная между концами металла, прямо пропорциональна проходящему через нее электрическому току. Константа пропорциональности называется сопротивлением металла. Она зависит от вида металла, будучи прямо пропорциональной длине провода и обратно пропорциональной площади его поперечного сечения.

[13] [Ohm25], [Ohm26], [Ohm66], [OF38], [Whe43], [Kir49], [Kir50], [Ros90, стр. 210-214 и 494-499], [Ram], [Sch63], [Whi73a, стр. 88-93 и 224-226], [JM86, стр. 51-62], [Ach96, Главы 6, 9, 10, 11 и 12], [Kip09], [Hae12] и [BW12a].

Глава 4

Проводники и изоляторы в некоторых простых экспериментах

4.1 Проводники и изоляторы в янтарном эффекте

Так называемый янтарный эффект, раздел 1.1, самый старый эксперимент с электричеством. Почти каждый школьник провел подобный эксперимент. Потрите пластиковую ручку или акриловую линейку о волосы и наблюдайте как она притягивает разбросанные по столу кусочки бумаги. В томе 1 этой книги было представлено описание того, что при этом происходит, наряду со многими связанными с этим эффектом экспериментами.[1] В настоящем разделе будет показано, что наше понимание того, что происходит в этом эффекте, отличается от объяснения, содержащегося в большинстве учебников.

Пусть у нас на столе лежат множество маленьких кусков бумаги. Электризуйте пластиковую расческу, потирая ее о волосы. Поднесите ее к кусочкам бумаги. Заметно, что она притягивает некоторые куски бумаги к себе. Это то, что наблюдается. Теперь мы перейдем к объяснению этого явления, начиная с того, что обычно пишут в учебниках.

4.1.1 Объяснение эффекта янтаря в учебниках

В большинстве учебников авторы пишут, что натираемый кусок материала из пластика (расческа, линейка, ...) становится электризованным. Он поляризует молекулы находящегося рядом кусочка бумаги на столе. Согласно

[1] Раздел 8.3 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

этим учебникам, часть каждой молекулы, которая находится ближе к электризованному пластику, электризуется зарядами противоположного знака. Часть каждой молекулы, которая дальше от электризованного пластика, электризуется зарядами того же знака, что и заряды наэлектризованного пластика. Тела, электризованные зарядами одного и того же знака, отталкивают друг друга, а электризованные противоположными зарядами притягивают друг друга. Электрическая сила уменьшается с увеличением расстояния между взаимодействующими зарядами. Поэтому часть молекулы, которая ближе к пластику, будет притягиваться к нему с силой, превышающей силу отталкивания, которую испытывает та часть молекулы, которая находится дальше от пластика. В резултате каждая поляризованная молекула бумаги притягивается куском пластика. То есть возникает суммарная сила F, которая притягивает весь кусок бумаги к потертму пластику. Если эта сила F превышает вес W бумаги, то бумага подскочит к пластику. В сущности, типичное объяснение силы притяжения, испытываемой куском бумаги со стороны потертого пластика, основано на разнице между притягивающими и отталкивающими силами, которые оказываются электризованным пластиком на противоположные части каждой поляризованной молекулы бумаги. Рис. 4.1 иллюстрирует это объяснение

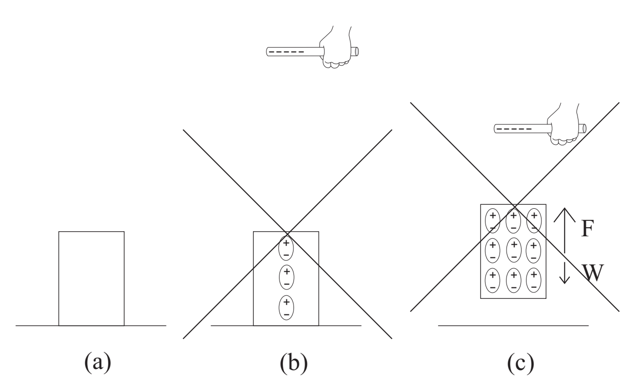


Рис. 4.1: Типичное объяснение янтарного эффекта. (a) Кусок бумаги на столе. (b) Молекулы бумаги, поляризованные присутствием близко расположеннной электризованной пластиковой соломы. (c) С еще большим приближением пластиковой соломы, поляризация молекул увеличивается. Если суммарная притягивающая сила F, оказываемая электризованным пластиком на все молекулы вместе, превышает вес W бумаги, она будет двигаться в сторону пластика.

Мы считаем, что это не правильное объяснение янтарного эффекта. Поэтому мы нанесли большой перечеркивающий крест на Рис. 4.1. Это явление, как оно описано в учебниках, действительно может иметь место. Но даже когда молекулы бумаги становятся поляризованными потертым пластиком, эта поляризация не является главным фактором, ответственным за притяжение небольшого куска бумаги. Это объяснение, встречающееся в большинстве учебников, подразумевает, что куски бумаги ведут себя как

изоляторы. Тем не менее, большинство видов бумаги и большинство легких веществ, обычно привлекаемых потертым куском янтаря или пластика, ведут себя как проводники.

Более того, в учебниках не обсуждается проводимость опоры, на которой первоначально размещаются куски бумаги. То есть, ничего не говорится о том, ведет ли эта опора себя как проводник или как изолятор.

4.1.2 Наше объяснение янтарного эффекта

Теперь мы изложим наше понимание основных явлений, лежащих в основе янтарного эффекта. Маленький кусок бумаги представлен на Рис. 4.2 (a) буквой C, указывая на то, что это проводник. Предполагается, этот кусок бумаги лежит на изолирующей поверхности I.

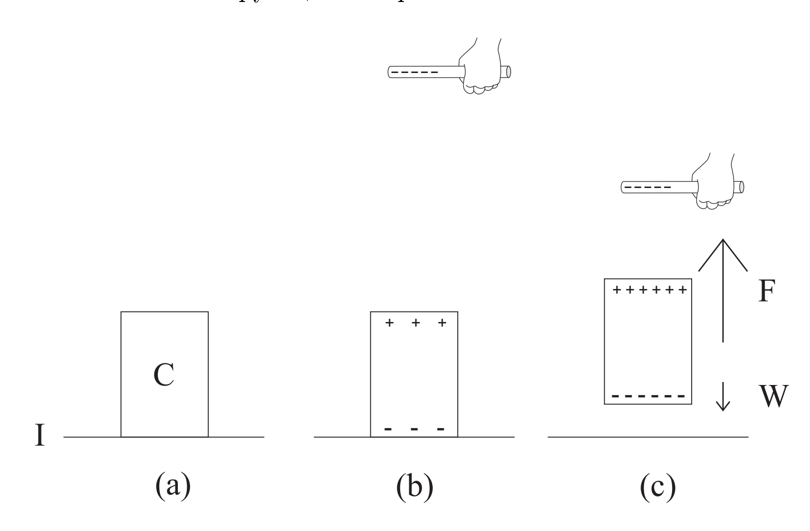


Рис. 4.2: (a) Проводящий кусок бумаги C на изолирующей поверхности I. (b) Макроскопическая поляризация проводника, вызванная присутствием электризованного куска пластика, находящегося рядом с ним. (c) С еще большим приближением пластика, количество поляризованных зарядов на бумаге увеличивается. Если сила F, которую оказывает электризованный пластик на макроскопически поляризованную проводящую бумагу, больше, чем вес W бумаги, она будет притягиваться к пластику.

Макроскопическая поляризация, которая возникает в проводнике, когда к нему приближается потертый пластик, является здесь главным фактором. То есть реальное разделение зарядов по всему объему проводника. Вместо простой поляризации молекул бумаги, близко расположенный электризованный кусок пластика создает макроскопическое разделение заряженных частиц по всему куску бумаги. Рис. 4.2 (b) качественно иллюстрирует эту макроскопическую поляризацию куска бумаги, когда он лежит на изолирующей поверхности I. На этом рисунке не представлены поляризованные

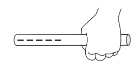
молекулы изолирующей поверхности. Когда пластик приближается, количество поляризованных зарядов на бумаге увеличивается. Если суммарная сила F, налагаемая электризованным пластиком на макроскопически поляризованную проводящую бумагу, больше, чем вес W бумаги, она будет притягиваться к пластику, Рис. 4.2 (c).

Допустим у нас есть два тела одинакового размера, веса и формы. Одно из них – проводник, а другое – изолятор. Они лежат на изолирующем столе далеко друг от друга. Пусть электризованный пластик подносится к этим телам, сохраняя одинаковое расстояние d от обоих тел. Когда он приблизится на малое и одинаковое для обоих тел расстоянии d, молекулы изолятора поляризуются. Эта микроскопическая поляризация даст эффективную поляризацию всего изолирующего тела. С другой стороны, электризованный пластик, находясь на том же расстоянии d от проводящего тела, вызовет в нем макроскопическую поляризацию. Эта макроскопическая поляризация проводника будет больше эффективной поляризации изолятора. Рис. 4.1 (c) иллюстрирует поляризацию куска бумаги, как это обычно дается в учебниках. Они ошибочно считают кусок бумаги изолятором. Эффективная поляризация этого куска бумаги представлена тремя положительными зарядами на верхней части бумаги и тремя отрицательными зарядами на ее нижней части, в то время как положительные и отрицательные заряды в ее внутренней части практически нейтрализуют друг друга. Рис. 4.2 (c), с другой стороны, качественно иллюстрирует реальную поляризацию бумаги, рассматривая ее как проводящий материал. Она представлена шестью положительными зарядами на верхней части бумаги и шестью отрицательными зарядами на ее нижней части. Эта поляризация больше эффективной поляризации тела из изолирующего материала, представленного на Рис. 4.1 (c). Поскольку макроскопическая поляризация проводника больше эффективной поляризации изолятора, суммарная сила притяжения F, оказываемая потертым пластиком на поляризованную бумагу, представлена на Рис. 4.2 (c) вектором большей величины, чем сила притяжения F, представленная на Рис. 4.1 (c).

Однако наиболее яркое проявление притягательного действия в янтарном эффекте мы наблюдаем, когда проводящее легкое тело покоится на проводящем основании C, Рис. 4.3 (a).

Примеры этой конфигурации: Куски бумаги на земле, на деревянном столе (доска должна быть без лакировки), на металлической поверхности и т. д. Когда проводящий кусок бумаги находится на проводящей опоре, бумага заземлена. Поэтому, когда электризованный кусок пластика приближается к бумаге, она приобретает суммарный заряд, имеющий знак, противоположный заряду пластика. Эта конфигурация представлена на Рис. 4.3 (b). Суммарный заряд, накопленный проводящей поверхностью, не представлен на этом рисунке. Когда пластик приближается, количество зарядов на бумаге увеличивается. Если сила притяжения F больше веса W бумаги, она движется к соломе, Рис. 4.3 (c).

Суммарная или полная сила F, оказываемая электризованным пластиком на бумагу, которая находится на проводящей поверхности, Рис. 4.3 (c)



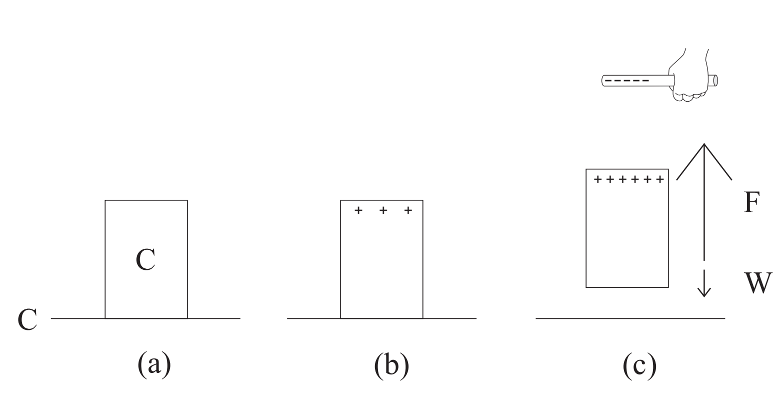


Рис. 4.3: (a) Проводящий кусок бумаги C на проводящей поверхности C. Эта бумага изначально заземлена. (b) Когда электризованная солома приближается к бумаге, она приобретает суммарный заряд противоположного знака. (c) При дальнейшем приближении пластика, количество зарядов на бумаге увеличивается. Если сила притяжения F больше веса W бумаги, она движется к соломе.

больше, чем суммарная сила, представленная на Рис. 4.2 (c).

Рис. 4.1 (c), 4.2 (c) и 4.3 (c) предполагают, что пластиковая солома в равной степени электризована во всех этих случаях. Кроме того, она всегда находится на одном и том же расстоянии d от куска бумаги, который движется к нему. Длина стрелки указывает на величину силы F, с которой электризованная солома действует на бумагу. Сила F на Рис. 4.2 (c) больше силы на Рис. 4.1 (c), потому что поляризация проводника больше чем эффективная поляризация изолятора. Сила F на Рис. 4.3 (c) больше силы на Рис. 4.2 ввиду того, что бумага на Рис. 4.3 (c) имеет отличный от нуля суммарный заряд, в то время как бумага на Рис. 4.2 (c) только поляризована и не имеет суммарного заряда.

В учебниках и среди многих учителей и учеников широко распространено ошибочное представление, что такие материалы, как бумага, дерево, стекло и резина, всегда ведут себя как изоляторы. Такое поведение может иметь место при низких напряжениях. Однако в электростатических экспериментах, где разность потенциалов обычно варьируется в пределах от 1000 В до 10000 В, дело обстоит иначе. Когда мы прикладываем такие высокие напряжения к концам куска бумаги, дерева, стекла или резины, материал ведет себя скорее как проводник. В экспериментах, подобных янтарному эффекту, такие высокие напряжения – обычное явление. Именно поэтому мы были так осторожны, когда подробно описывали этот эффект в томе 1 этой книги, где даны несколько поучительных примеров.[2]

[2]Раздел 8.3 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

В первом же эксперименте, данном в томе 1 нашей книги, мы познакомились с янтарным эффектом. Последний эксперимент там касался аналогичного явления, где мы могли проверить наличие суммарного заряда, полученного притянутым куском бумаги. Более того, в томе 1 мы обсуждали некоторые инструменты, сделанные из бумаги, где бумага вела себя как проводник. В этих приборах мы также использовали такие проводящие материалы, как картон и папиросная бумага. В частности, можно упомянуть электрический маятник и электроскоп.[3] Эта форма организаци книги была результатом тщательного обдумывания. Очень просто провести эксперимент, аналогичный янтарному эффекту. Однако не так просто правильно описать многие важные факторы, связанные с этим явлением.

4.1.3 Важность подробного объяснения янтарного эффекта

Подраздел 4.1.1 представил учебное объяснение янтарного эффекта. Наше собственное объяснение этого эффекта было представлено в подразделе 4.1.2. Наше описание существенно отличается от того, что дается обычно в учебниках. По нашему мнению важно исправить учебники по ряду причин:

- Янтарный эффект – самый старый эксперимент с электричеством. Современные учебники не должны приводить неверное объяснение этого важного явления.

- Почти все проводили аналогичный эксперимент в средней школе, просто для удовольствия или в качестве забавной игры. Они потирали о волосы пластиковую соломку или акриловую линейку и притягивали кусочки бумаги со стола. Этот простейший эксперимент будет для многих одним из редких физических экспериментов, когда-либо проведенных ими в своей жизни, особенно для тех, кто бросит учебу после окончания средней школы или продолжит ее в области гуманитарных или биологических наук на университетском уровне. Поэтому важно представить четкую и правильную картину этого эффекта.

- Объяснение из подраздела 4.1.1 можно считать более простым, чем описание, представленное в подразделе 4.1.2. Тем не менее, лучше представить тщательное и сложное описание, которое по существу правильно, чем представить простое, но неправильное объяснение. Более простое объяснение не всегда является лучшим. Мы узнаем много важных деталей, когда тщательно изучаем то, что происходит в таком, казалось бы, очень простом явлении.

- Даже, казалось бы, очень простые и повседневные явления могут скрывать важные сюрпризы и тонкости, как в случае с янтарным эффектом.

[3] Разделы 2.1, 2.2, 4.4, 6.1, 6.5 и 7.15 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

- Правильное описание этого явления требует понимания сущности проводников и изоляторов и некоторых основных их свойств. Понимание этих аспектов дает более полную картину того, что происходит в этом явлении. Затем мы можем рассмотреть эти чрезвычайно важные аспекты при анализе других более сложных явлений природы.

- Имея правильное объяснение, мы узнаем, что легкие тела (например, кусочки бумаги, перья или хлопчатобумажная нить), притягиваемые потертым пластиком, обычно ведут себя как проводники в электростатических экспериментах.

- С правильным объяснением мы также узнаем, что поверхность, на которой легкие тела покоятся перед притяжением (например, поверхности металлических или деревянных предметов), обычно ведет себя так же, как проводящие и заземленные поверхности в электростатических экспериментах.

Эти два последних пункта – очень важные аспекты, о которых нужно всегда помнить. С их учетом мы можем объяснить многие другие любопытные явления, связанные с электричеством.

4.2 Проводники и изоляторы в эксперименте по притяжению потока воды

Многие люди сами проводили или по крайней мере наблюдали простой эксперимент, описанный во многих учебниках по электричеству, показывающий притяжение потока воды, поступающего из крана как в эксперименте 3.7. Предположим, мы зарядили пластиковую солому отрицательно посредством трения. Поднесем ее близко к потоку воды. Вода склоняется к соломе, Рис. 3.8. В томе 1 этой книги дается подробное описание притяжения потока воды.[4] Мы хотим подчеркнуть здесь, что это описание отличается от объяснений, которые встречаются в большинстве учебников.

4.2.1 Объяснение притяжения потока воды в учебниках

В большинстве учебников, где разбирается этот феномен, упоминается, что вода состоит из полярных молекул. Из-за разницы в электроотрицательности между связанными атомами кислорода и водорода в каждой молекуле имеется постоянный дипольный момент. Атом кислорода отрицательно электризован, а атомы водорода положительно электризованы. Этот дисбаланс приводит к молекулярному дипольному моменту, направленному от отрицательного атома кислорода к положительной области между двумя атомами водорода. Поэтому, даже если нет внешнего воздействия, каждая

[4] Разделы 2.5 и 7.11 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

молекула воды имеет постоянную положительную сторону и отрицательную сторону равной величины. Объяснение изгиба потока воды в учебниках основано в основном на этом свойстве молекул воды. Первоначально молекулы воды ориентированы хаотическим образом. Учебники отмечают, что когда электризованное тело приближается к потоку, полярные молекулы воды ориентируются этим телом. Рассмотрим отрицательно заряженную солому рядом с потоком. Электрическое действие соломы на электризованные участки каждой молекулы, поворачивает молекулы воды. В частности, положительная сторона каждой молекулы повернется к отрицательной соломе, становясь ближе к ней, в то время как отрицательная сторона каждой молекулы отвернется от нее, становясь чуть дальше от соломы. Электрическая сила уменьшается с увеличением расстояния между взаимодействующими телами. Поэтому положительная часть каждой ориентированной молекулы будет притягиваться соломой с силой, немного превышающей силу отталкивания, действующей на отрицательную часть каждой молекулы. В результате, каждая молекула воды испытывает суммарную притягивающую силу, направленную в сторону электризованной соломки. Согласно учебникам, именно этим объясняется изгиб потока, как схематично представлено на Рис. 4.4.

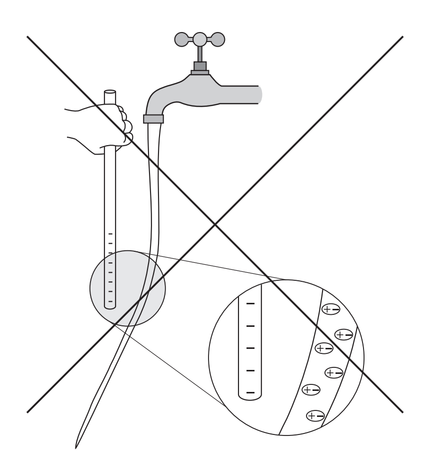


Рис. 4.4: Неправильное объяснение изгиба потока ориентацией полярных молекул воды, когда потертая солома подносится к воде.

Мы считаем, что это не правильное объяснение этого явления, на что указывает большой символ × перечеркивания на Рис. 4.4. В учебниках молчаливо подразумевается, что вода является изолятором. Если бы это было так, тогда не было бы зарядов, которые могли свободно передвигаться по всему объему воды. Действие электризованной соломы ограничилось бы изменением ориентации полярных молекул воды. Мы не сомневаемся, что такое действие имеет место, но оно не является главным механизмом, обуславливающим изгиб потока.

4.2.2 Наше объяснение притяжения потока воды

Приведем теперь наше описание этого явления. Основное различие между нашим описанием и объяснением в учебниках заключается в том, что мы рассматриваем воду из под крана как хороший проводник в электростатических экспериментах. В конце концов, вода разряжает электризованный электроскоп, как показано в эксперименте 3.5, Рис. 3.6. Конечно, вода состоит в основном из полярных молекул H_2O. Но она также содержит соли, различные примеси, H_3O^+ и OH^-, наряду с другими ионами и т. д. Эти вещества заставляют воду вести себя как проводник.

Рассмотрим сначала капающую течку крана, Рис. 4.5 (a).

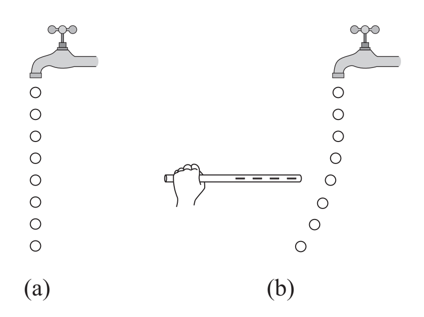


Рис. 4.5: (a) Капающий кран. (b) Отрицательно электризованная солома притягивает капли воды.

Отрицательно электризованная солома изгибает траекторию капель воды, Рис. 4.5 (b). Предположим, что солома находится далеко от крана и что она может повлиять только на близлежащие капли воды. Предположим, что вода ведет себя как проводник. Когда отрицательная солома приближается к каплям, они становятся поляризованными. В каждой капле есть реальное разделение зарядов. Ближайшая часть капли становится положительно электризованной, а самая дальняя часть становится отрицательной, Рис. 4.6.

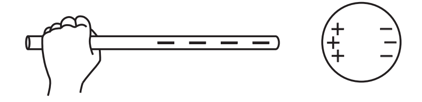


Рис. 4.6: Капля воды, поляризованная отрицательной соломой.

Величина электрической силы увеличивается, когда расстояние между взаимодействующими телами уменьшается. Поэтому положительная часть капли притягивается соломой с большей силой, чем сила отталкивания, действующая на отрицательную часть капли. Этот дисбаланс сил создает полную силу притяжения, действующую на каплю. В результате она движется к соломе.

Рассмотрим теперь непрерывный поток воды. Когда отрицательная солома приближается к потоку, вода изгибается. Часть потока, расположенная ближе к соломе, становится положительно заряженной, а часть, удаленная от соломы, становится отрицательной. Предполагая непрерывный поток, удаленная от отрицательной соломы часть нейтрализуется благодаря обену электризованных частиц между водой и Землей. В конце концов, это заземленный поток, так как проводящий поток воды контактирует с водой в кране, трубами и т. д. Поток воды затем положительно электризуется на той стороне, которая находится ближе к отрицательно заряженной соломе.[5] Таким образом появляется сила притяжения между отрицательной соломой и положительным потоком, изгибаяя поток воды в сторону пластика. Рис. 4.7 качественно иллюстрирует распределение зарядов в потоке воды.

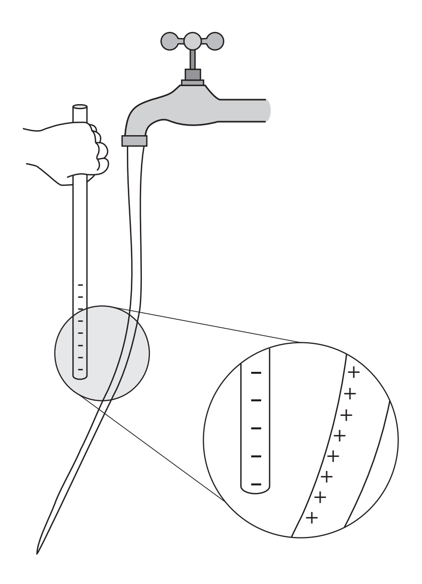


Рис. 4.7: электризация заземленного проводящего потока воды при приближении электризованного тела.

Еще раз, существует ошибочное представление, что водопроводная вода является изолятором. Согласно этому представлению, полярные молекулы воды ориентируются внешней электрической силой. Затем ориетированные молекулы притягиваются внешним заряженным телом. Но на самом деле пресная вода содержит много солей, минералов и примесей, которые изобилуют электрически заряженными частицами, так называемыми ионами, как, например, H_3O^+ и OH^-. При наличии большой разности потенциалов эти электризованные ионы могут перемещаться в воде, так что вода начинает вести себя как проводник. Затем, когда внешнее электризованное тело приближается к ней, масса воды приобретает макроскопическую по-

[5] Разделы 2.5 и 7.11 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

ляризацию. Если при этом объем воды электрически заземлен, он получает суммарный заряд со знаком противоположным заряду расположенного рядом электризованного тела. Эффекты, вызванные этой макроскопической поляризацией или суммарным зарядом, накопленным в объеме воды, будут гораздо более интенсивными, чем любой эффект, вызванный лишь ориентацией полярных молекул воды.[6] Одним из таких эффектов является изгиб потока. Величина изгиба для проводящей жидкости, такой как вода, намного больше, чем изгиб для изолирующей жидкости, такой как масло, при условии, что обе жидкости находятся на одинаковом расстоянии от одной и той же электризованной соломы, рисунки 3.8 и 3.9

Фейнман, Лейтон и Сэндс принадлежат к редкой категории современных авторов, которые правильно рассматривают водопроводную воду как проводник.[7]

4.2.3 Важно представить детальное объяснение притяжения потока воды

Подраздел 4.2.1 представил объяснение эксперимента с отклонением потока воды электризованной соломой, которое мы обычно находим в учебниках. Наше собственное объяснение этого эффекта было представлено в подразделе 4.2.2. Наше описание существенно отличается от того, что обычно дается в учебниках, и мы считаем, что нужно внести исправления в учебники. Помимо причин, приведенных в подразделе в пользу корректировки учебников 4.1.3, можно упомянуть:

- Эксперимент по притяжению потока воды является одним из самых простых явлений электричества и излагается во многих учебниках. Современные учебники не должны приводить неверное объяснение этого простого явления.

- Многие видели описание этого эксперимента в интернете, и, возможно, даже выполняли его самостоятельно дома или в школе. Они заслуживают ясного и правильного описания этого эффекта.

- С правильным объяснением мы узнаем, что вода ведет себя как проводник в электростатических экспериментах. Это очень важный аспект, о котором следует помнить. Четкое понимание этого факта, дает нам возможность объяснить многие другие любопытные явления, связанные с электричеством. В частности, решающая роль воды и влажности в этих экспериментах становиться для нас очевидным.

[6] Обсуждение этой темы см. [WB11], [Jec12], [BW12d] вместе с разделами 2.5 и 7.11 из [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

[7] [FLS64, стр. 9-8].

4.3 Различия между старыми и современными стеклами

Электрические явления были впервые описаны древними греками, знаменитый янтарный эффект, раздел 1.1. В XVII и XVIII веках люди обычно заменяли янтарь стеклянной трубкой при проведении этих экспериментов. Что касается электрического поведения стекол, есть три основных отличия между старыми и современными видами стекол. Под старыми стеклами мы имеем в виду стеклянные трубки, сферы и цилиндры, какими пользовались Фрэнсис Хоуксби (примерно 1666-1713), Стивен Грей (1666-1736), Шарль Дюфе (1698-1739), Жан Антуан Нолле (1700-1770) и Бенджамин Франклин (1706-1790), например. Под современными стеклами мы понимаем обычные типы стекол, которые встречаются в повседневной жизни (например, стакан для питья, бутылка, тарелка, оконное стекло, зеркало, лампочка и т. д.) или в магазинах розничной торговли (стакан, пробирка, объектив, слайд микроскопа, призма и т. д.)

Эти различия могут быть связаны с химическим составом этих стекол, а также с процессами изготовления стеклянных продуктов. Грей, в частности, проводил большую часть своих экспериментов, электризуя кремниевую трубку, которая представляет собой особый вид стекла, содержащий свинец.[8] Кремниевое стекло было разработано Джорджем Равенкрофтом (1632-1683) около 1662 года; оно является предшественником английского свинцового стекла или кристалла, обычно называемого кристаллом (хотя это аморфный материал, не имеющий кристаллической структуры).

Здесь важно подчеркнуть эти различия не только из-за исторических аспектов, связанных с оригинальными экспериментами этих ранних ученых, но и из-за их современных педагогических и дидактических аспектов. После всего, когда мы пытаемся воспроизвести некоторые из ранних экспериментов, пользуясь современными стеклами, многие из них работают не так, как в них описано. Иногда ожидаемый эффект может происходить с такой малой интенсивностью или амплитудой, что трудно заметить его. В следующих трех подразделах обсуждаются основные различия между старыми и современными стеклами, начиная с наиболее важных.[9]

4.3.1 Проводящее или изолирующее поведение

В статье Стивена Грея 1707-1708 года есть упоминание, что он потирал кремниевую трубку голой рукой.[10] После потирания трубки он держал ее в руке во время экспериментов. Другие исследователи этого периода, как Хоуксби, Дюфе и Ноллет, тоже заряжали стеклянные трубки трением. Эти трубки были изготовлены с обычных стекол того периода. Большинство

[8] [Chi54], [Hau], [RR57, стр. 570 и 584-585], [Hom81, стр. 13] и [Hei99, стр. 235-236].

[9] [Bos11, раздел 2.5] и [BAC12, раздел 4.5, стр. 93-100]. Смотри также главу 1, разделы 5.1 и 6.3 вместе с Приложением B, раздел B.1 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

[10] [Chi54, стр. 34 и 37].

рисунков и картин того периода, изображающих электрические эксперименты, показывают, что исследователи держат потертые трубки голыми руками. При этом трубки не теряли свой заряд.

Это говорит о том, что стеклянные трубки в этих экспериментах вели себя как отличные изоляторы. Электризованные трубки не разряжались в землю через руки исследователей. Однако многие современные виды стекла ведут себя как хорошие проводники для электростатических экспериментов. В этом состоит основное различие между старыми и современными стеклами.

Проводящие свойства многих видов современного стекла легко обнаружить с помощью эксперимента 3.4 раздела 3.1. То есть, когда кусок стекла, удерживаемый в руке, касается картона заряженного электроскопа, он быстро разряжается. Хотя такое поведение является обычным для многих типов современных стекол, некоторые виды стекла по-прежнему ведут себя как изоляторы. Проводящие и изолирующие свойства любого куска стекла зависит от его внутреннего строения, от состояния его поверхности и процесса его изготовления.

Поэтому трудно электризовать многие виды современного стекла с помощью процедуры Грея. Возьмите, например, стеклянную чашку в руки и потрите ее волосами или хлопчатобумажной тканью. Если поднеси потертую чашку к кусочкам бумаги на столе, никакого притяжения не будет. Даже когда есть притяжение, как правило оно будет иметь такую низкую интенсивность, что не легко его обнаружить. Отсутствие притяжения объясняется тем, что современное стекло ведет себя как проводник. Независимо от количества заряда, которое чашка приобретает во время трения, большая часть его нейтрализуется зарядами, которые поступают с земли через наше тело и руки как только прекращается трение.

Согласно Боссу и его соавторов, электропроводность стекла может сильно меняться с изменением его химического состава.[11] Поэтому можно легко найти теперь стекла, которые ведут себя как проводники, так и стекла, которые ведут себя как изоляторы, в электростатических экспериментах. Поэтому, прежде чем пытаться воспроизвести какой-либо старый эксперимент, используя современные стекла, проверьте как они ведут себя электрически. Этот тест очень важен. Если они ведут себя как изоляторы, есть хороший шанс для успешного воспроизведения старого эксперимента, где стеклянную трубку надо держать в руке. Если же они ведут себя как проводники, перед проведением эксперимента стекло должно быть изолировано от земли. Стекло должно быть закреплено на изолирующей ручке. Стекло нужно держать за эту ручку, чтобы предотвратить разряд. Затем стеклянную трубку можно потереть другим материалом и использовать электризованный и изолированный кусок стекла для проведения различных экспериментов.

Многие виды стекла могут менять свое электрическое поведение при небольшом нагревании. Проводящий кусок стекла можно превратить в изо-

[11] [Bos].

лирующий простым согреванием на огне или в микроволновой печи.

На поверхности стекла может остаться пот от руки. Этого нужно избегать ввиду высокой проводимости влаги по сравнению с проводимостью стекла. Некоторые стекла ведут себя как проводники из-за влаги или водяного пара, накопленных на их поверхности. Когда предметы из стекла нагреваются, эта вода испаряется, в результате они могут вести себя как изоляторы. То есть, нагревание увеличивает количество заряда, которое стекло может удерживать на своей поверхности после потирания. Стекло представляет собой гигроскопичный материал, поглощающий влажность воздуха, и тем самым увеличивается его проводящее свойство.[12] Проводимость стекла зависит от его состава и состояния его поверхности. Теплое стекло обычно лучше изолирует, чем стекло при комнатной температуре.

Другим фактором, который может увеличить изолирующее свойство стекла, является увеличение его длины, как описано в разделе 3.3.4. Предположим, что один конец стеклянной трубки потирается, удерживая ее рукой за другой конец. Между ними будет достаточное количество сухого стекла, что обеспечит хорошую степень изоляции. Кроме того, длинные трубки имеют большее электрическое сопротивление, чем короткие. Поэтому более длинные трубки будут дольше сохранять заряды, полученные при трении. Грей, в частности, обычно работал со стеклянной трубкой длиной 1 м.

4.3.2 Плотность поверхностных зарядов, полученных трением

Рассмотрим современное стекло, которое вследствие химического состава, процесса изготовления или предварительного подогрева ведет себя как изолятор . Даже в этом случае существует важное различие между этим стеклом и старыми видами стекол. Стивен Грей и другие ранние ученые были в состоянии получать электрические эффекты такой интенисивности, что они легко наблюдались на больших расстояниях. Например, притягивать легкие тела на расстоянии 10 или 20 см от трубки. Им также удалось передать электрическое действие, т. е. способность притягивать, через очень длинные проводящие шнуры, которые были изолированы от земли. Некоторые из этих шнуров имели длину более 100 м. Электризованная стеклянная трубка касалась одного конца шнура или находилась рядом с ним. Другой конец длинного шнура (или проводящего тела, прикрепленного к этому другому концу шнура) мог тогда притягивать легкие тела, расположенные близко к нему, например, латунные листочки. Затем Грею удалось создать сильную поляризацию шнура благодаря большому количества заряда, накопленного на поверхности стеклянной трубки в процесса трения. Более того, Грей мог легко производить искры или электрические разряды, поднося близко электризованную стеклянную трубку к другим проводящим телам.

---

[12] [WB09].

Трудно воспроизвести некоторые из этих эффектов с такой же яркостью (или на этих расстояниях) с использованием современных материалов, которые заряжаются трением вручную. Чтобы провести эти эксперименты, изолятор должен быть электризован трением. Этот изолятор может быть, например, предварительно нагретым стеклом, пластиковой соломой, акриловой линейкой или трубкой из ПВХ. Даже когда мы воспроизводим некоторые из явлений, описанных Греем, порядок величины наблюдаемых эффектов обычно меньше, чем явления, упомянутые в работах Грея. Измерьте, например, критическое расстояние, на котором потертая солома или трубка из ПВХ начинает привлекать небольшие кусочки бумаги. Это расстояние обычно меньше критического расстояния, на котором Грею удавалось притягивать легкие тела своей трубой. Мы можем также поляризовать концы изолированной и проводящей металлической проволоки, поднося ее близко к потертой акриловой линейке или пластиковой соломе. Однако величина этой поляризации будет как правило меньше, чем величина поляризации полученных Греем для шнуров, которые он подносил близко к трубке из потертого стекла. Поместите кусочки бумаги рядом с одним концом металлической проволоки и поднесите потертую трубку из ПВХ близко к другому концу. Измерьте максимальную длину провода, при которой он все еще притягивает куски бумаги. Она, как правило, будет меньше соответствующей длины шнуров в опытах Грея. В настоящее время нелегко получить видимые искры или электрические разряды, потирая изолятор в руке, а затем приближая его к проводящему телу. Даже когда нам удается получить эти искры, они происходят только на очень малых расстояниях между электризованной пластиковой соломой и расположенным рядом проводником. Грей же получал большие и видимые искры с помощью наэлектризованной трубки на расстояниях 10 или 20 см от проводящего тела.

Объяснение этой разницы в поведении или в порядке величины наблюдаемых эффектов сводится к разнице плотностей поверхностных зарядов, полученных трением. Трубка Грея была не только отличным изолятором – она могла еще приобретать большую плотность поверхностного заряда за счет трения. Плотность зарядов, которую он получал, намного превышает плотность поверхностных зарядов, которую можно получить с нашими изоляторами, даже когда мы используем хорошие изоляторы, такие как пластиковая солома, акриловая линейка или труба из ПВХ. Поскольку мы получаем лишь небольшое количество поверхностного заряда за счет трения, трудно воспроизвести некоторые эксперименты Грея с получением эффектов такой же интенсивности.

4.3.3 Знак зарядов, полученных трением стекла

Третья разница между старыми и современными стеклами связана с типом электрических зарядов, полученных материалом при его трении руками.[13]

[13] Разделы 5.2-5.4 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

Дюфе обнаружил существование двух видов электричества. Он также предложил правило, согласно которому тела, электризованные зарядами одного типа, отталкивают друг друга, а тела, электризованные зарядами противоположного знака, притягивают друг друга. Эти открытия были опубликованы в 1733 году.[14] Он обнаружил, что стекло, горный хрусталь, драгоценные камни, волосы животных и шерсти приобретают электричество первого типа, если потирать их о кожу или шелк. С другой стороны, янтарь, копал, шелковая ткань, нитка и бумага, приобретали электричество второго типа при потирании их кожей или шелковой тканью. Соответственно, он назвал *стекловидное электричество* первым видом электричества и *смолистое электричество* вторым видом.

Спустя двадцать лет после публикации этих результатов были обнаружены некоторые новые эффекты. В частности, было замечено, что шероховатое или неполированное стекло может быть заряжено стекловидным электричеством, когда трение производится фланелью, или смолистым – при потирании масляным шелком. Этот эффект наблюдался и с другими материалами. То есть один и тот же материал может приобретать электричество как первого, так и второго рода в зависимости от материала, которым он натирается. Это открытие привело к созданию так называемого трибоэлектрического ряда. Самые первые такие ряды были опубликованы в 1757 и 1759 годах

В трибоэлектрическом ряду за символом $+$ следуют многие тела, заканчивающиеся символом $-$. Когда тело I потирается телом II, положительно заряженным будет тело, которое ближе к символу $+$, в то время как другое тело зарядится отрицательно.

Со временем терминология Дюфе потеряла свое значение и появились другие термины. Было достигнуто соглашение заменить термины стекловидное и смолистое типы электричества на *положительное и отрицательное типы электричества*, соответственно, по определению. В настоящее время используются и другие, аналогичные им выражения, как, например, *положительные и отрицательные электрические заряды* или *положительно и отрицательно заряженные тела*.

Теперь мы можем объяснить третье различие между старыми и современными стеклами. Оно связано с видом электризации, приобретаемой куском стекла при потирании кожей человека. Современные стекла очень близки к коже в трибоэлектрическом ряду.[15] В частности, некоторые виды стекла будут ближе к символу $+$ в трибоэлектрическом ряду, чем человеческая кожа. Назовем эти стекла A. Другие виды стекла будут ближе к символу $-$ в трибоэлектрическом ряду, чем человеческая кожа. Назовем их B, Таблица 4.1.

Когда стекло A натирается кожей, стекло становится положительно заряженным. С другой стороны, когда стекло B натирается кожей, оно становится отрицательно заряженным. Чтобы узнать, принадлежит ли какой-то

[14] [DF33b], [DF] и [BC07].
[15] Раздел 5.4 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

+
стекло типа A
человеческая кожа
стекло типа B
−

Таблица 4.1: Трибоэлектрическая серия для современных стекол.

конкретный кусок стекла к типу A или B, потрите его кожей и проверьте приобретенный заряд. Например, проверьте отталкивается или притягивается этот кусок стекла другим телом, ранее заряженным положительно. Таким образом, эксперименты такого типа позволят нам классифицировать любой кусок стекла как вид A или B.

В заключение, современные стекла могут получить положительную или отрицательную электризацию при потирании кожи человека. Старые стекла, которые использовались в опытах Грея и других исследователей того периода, с другой стороны, обычно приобретали только положительную электризацию при потирании о кожу.

4.3.4 Важность корректировки изложения электрических свойств стекла в современных учебниках

Большинство современных учебников начинают изучение электричества с янтарного эффекта. В описании эксперимента янтарь обычно заменяется стеклянной трубкой. Стеклянные трубки используются также при введении двух видов электричества – положительного и отрицательного. И в том и в другом случае авторы предполагают прямо или косвенно, что стекло является изолятором для электростатических экспериментов.

Фигуры или рисунки в этих учебниках обычно показывают потертую трубку, удерживаемую в голой руке. Они заменяют янтарь электризованной стеклянной трубкой и описывают притяжение легких тел со стола, притяжение и отталкивание электрического маятника этой электризованной стеклянной трубкой, ее влияние на соседний электроскоп и т. д. По всей видимости, в большинстве случаев авторы современных учебников просто копируют из других учебников *гипотетические* результаты подобных экспериментов. То есть они сами, вероятно, не проводили эксперименты. Наше предположение основано на следующих соображениях. Во-первых, найти стеклянный стержень дома или в обычном магазине нелегко. В любом случае, даже если мы попробуем провести эти эксперименты со стеклянной чашкой или пробиркой, описанные эффекты обычно не будут иметь место или будут происходить с такой низкой интенсивностью, что их нелегко обнаружить невооруженным глазом. Кроме всего этого, большинство современных стекол ведут себя как проводники. Поэтому, удерживая их в руке, невозможно сохранить заряд, полученный во время трения из-за эффекта

заземления.

Другой эксперимент, который описывается во многих учебниках, связан с существованием двух видов заряда, положительного и отрицательного. Иногда пишут, что стеклянная трубка становится положительной при потирании шелком, а резиновый стержень становится отрицательным при его потирании акриловой тканью. Сила отталкивания между двумя электрически заряженными стеклянными трубками иллюстрируется одной из этих трубок, подвешенной ниткой, в то время как другая трубка удерживается голыми руками, Рис. 4.8 (a). Иногда этот *гипотетический* эксперимент также иллюстрируется двумя трубками, подвешенными на нитях, Рис. 4.8 (b).

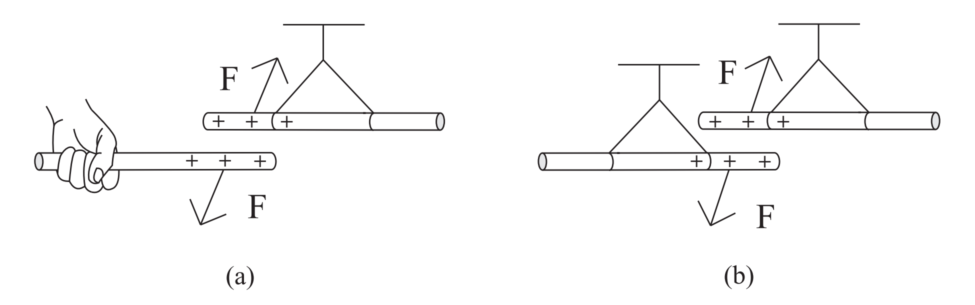


Рис. 4.8: (a) Силы отталкивания между двумя стеклянными трубками; одна удерживается голой рукой, в то время как другая подвешена нитью. (b) Силы отталкивания между двумя стеклянными трубами, подвешенными на нитях.

Заменяя одну из подвешенных положительных стеклянных трубок подвешенным отрицательным резиновым стержнем, учебники иллюстрируют силы притяжения между противоположно электризованными телами.

Учебники снова преполагают прямо или косвенно, что стекло ведет себя как изолятор. Действительно, в противном случае стеклянная трубка не может оставаться электризованной, поскольку она удерживается голой рукой. То же самое предположение делается и в том случае, когда считается, что подвешенная на нити трубка остается в электризованном состоянии. Не указывается даже материал нити и не обсуждается, является ли эта нить проводником или изолятором.

Если студент попробует повторить этот эксперимент со стеклянной трубкой или чашкой, вероятно, он не будет наблюдать никакого отталкивания, потому что, как уже упоминалось выше, современное стекло обычно ведет себя как проводник. Таким образом, потертое стекло не останется электризованным, если держать его голыми руками. Не останется он электризованным и в подвешенном состоянии для большинства видов нитей (хлопок, лен, ...), поскольку эти нити ведут себя как проводники. В результате ученик может разочароваться. Он может заключить, что эксперимент не удается из-за отсутствия у него способностей или навыков в физике. Он может даже потерять интерес, который у него изначально был к этому предмету.

Очевидно, что в некоторых учебниках описываются настоящие эксперименты, выполненные с использованием современных стеклянных трубок и получением ожидаемых эффектов. В этих случаях опыты очевидно проводились с изолирующими электризованными стеклами. Однако нужно помнить, что описанные эксперименты не будут работать с большинством стекол, которые встречаются в быту, так как они ведут себя как проводники.

В заключение, перед проведением экспериментов со стеклами, необходимо заранее выяснить, как они ведут себя – как проводники или как изоляторы.

4.4 Механизм *ПКО*

В томе 1 этой книги обсуждался так называемый механизм ПКО, открытый Дюфе в 1733 году.[16] Это явление обычно происходит, когда легкий проводник, электрически изолированный от земли, притягивается электризованным телом. Он касается этого тела и затем отталкивается от него. Переход от притяжения к отталкиванию иногда происходит при приближении легкого тела к электризованному телу без касания. Хейльброн ввел обозначение ПКО для этого простого правила притяжения, коммуникации электричества и отталкиванием (т. е. Притяжение, Коммуникация, Отталкивание).[17] Акроним ПКО можно также трактовать как Притяжение, Контакт и Отталкивание.

Эксперименты 4.1, 4.2 и 4.3 показывают простые ситуации, иллюстрирующие этот механизм.

Эксперимент 4.1 - *Несколько плавающих прядей из хлопка*

Рассмотрим сначала такой объект, как пуховое перо или прядь из нескольких волокон хлопка. Здесь важно, чтобы выбранный объект занимал много времени, чтобы упасть на землю в воздухе, например, около 10 секунд при падении с высоты двух метров. Лучше, если он будет падать еще медленнее. При слишком быстром падении невозможно будет наблюдать описанные ниже эффекты.

Потрите пластиковую соломку или акриловую линейку о волосы. Держите потертую солому или акриловую линейку горизонтально. Отпустите перышко или кусок хлопка чуть выше соломы. Объект притягивается к соломе и прилипает к ней, Рис. 4.9 (a) и (b).

Если мы внимательно посмотрим на объект, мы увидим, как его ворсинки вытягиваются, как будто они хотят отойти от соломы. Иногда объект отскакивает вверх после контакта с потертой соломой. Если этого не происходит сразу, мы можем побудить объект освободиться, похлопав или подув слегка на объект. После того, как объект освободился от соломы и начинает падать, поместите потертую солому ниже падающего объекта. Затем

[16] Разделы 4.2 и 4.8 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

[17] [Hei99, стр. 5 и 255-258].

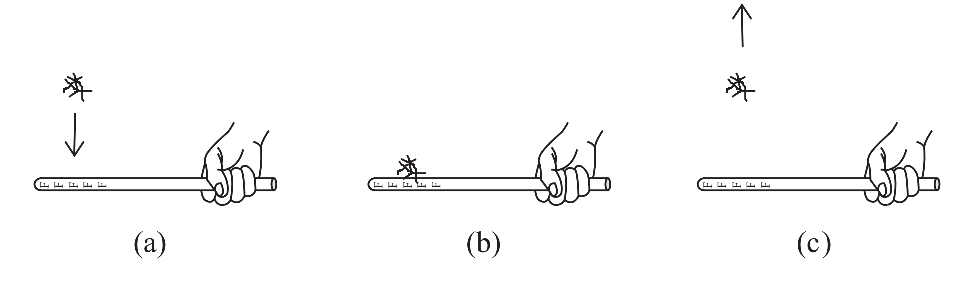


Рис. 4.9: (a) Кусок хлопка изначально притягивается потертой пластиковой соломой. (b) Хлопок касается потертой части соломы. (c) После контакта хлопок отталкивается соломой. Затем его можно парить над соломой, несмотря на гравитационное притяжение Земли!

объект отталкивается соломой и движется вверх. Иногда это происходит не сразу, поскольку объект должен коснуться потертой соломы два или три раза и освободиться после каждого касания, прежде чем он может оттолкнутся от него. Чем больше электризована солома, тем быстрее объект будет отталкиваться после прикосновения к ней. Рис. 4.9 (c).

Помещая медленно потертую солому ниже предмета, переместите его в любое место внутри комнаты. Если объект находится очень близко к нашему телу или к любому другому предмету в комнате, он притягивается к нашему телу или предмету и прилипает к нему. Чтобы этого не произошло, используйте потертую соломку, чтобы оттолкнуть объект от этих тел. Тогда объект можно легко удерживать в парящем состоянии в течение некоторого времени на расстоянии 10-20 см над соломой, в зависимости от того, насколько хорошо электризована солома. Чтобы объект парил, потертую солому нужно постоянно держать под предметом, следуя его движениям и одновременно направляя его.

Эксперимент 4.2 - *Парение головки одуванчика*

Рис. 4.10 иллюстрирует аналогичный эксперимент, проведенный с одуванчиком. Одуванчик естественно падает очень медленно, поэтому он подходит для этого эксперимента. Его легко держать в парящем состоянии над пластмассовой соломой, потертой волосами.

Эксперимент с одуванчиком обычно легче проводить, чем с клубком хлопка. Когда одуванчик запускается в воздухе над потертой соломой, его притягивает солома, касается ее и сразу же отталкивается от нее.

Эксперименты 4.1 и 4.2 очень просты, но чрезвычайно любопытны. Они производят незабываемое впечатление на каждого, кто проводит их. О. Герике (1602-1686), Стивен Грей и Дюфе проводили подобные эксперименты и они имели большое историческое значение. Очень интересное видео, показывающее современное воспроизведение левитации тонкого золотого ли-

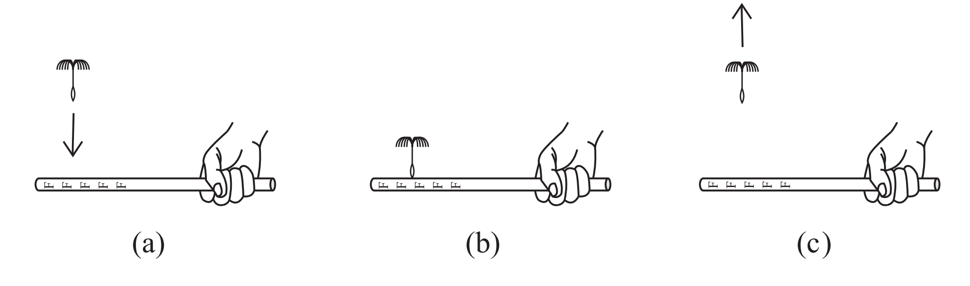


Рис. 4.10: Эксперимент 4.9 можно легко выполнить с одуванчиком, плавающим над пластиковой соломой, потертой волосами.

сточка, было сделано Блонделем и Вольфом,[18] “La danse des feuilles d’or.”

Эксперимент 4.3 - *Отталкивание между электризованным телом и бумажным диском электрического маятника*

Используйте классический электрический маятник, состоящий из небольшого диска, изготовленного из бумаги или алюминиевой фольги с диаметром порядка 1 или 2 см, привязанный к нижнему свободному концу нити из шелка, нейлона или полиэстера, Рис. 2.10. Электризуйте пластиковую соломку или акриловую расческу, быстро потирая ее волосами, салфеткой или хлопчатобумажной тканью. Поднесите его к маятнику. Диск притягивается соломой, касается ее и затем отталкивается соломой, Рис. 4.11.

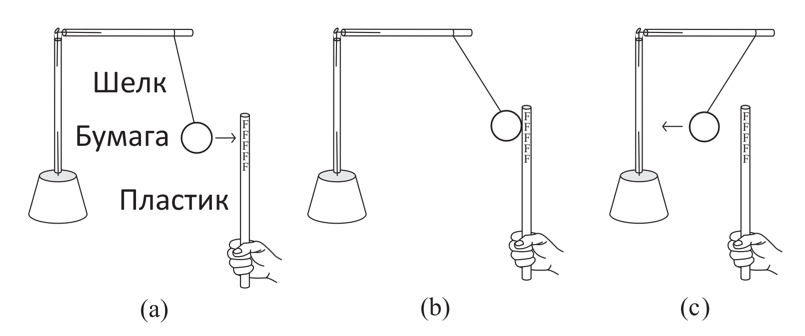


Рис. 4.11: (a) Бумажный диск изначально притягивается потертым пластиком, (b) касается его и затем (c) отталкивается соломой.

Иногда бумажный диск не сразу отталкивается потертым пластиком после контакта, оставаясь на нем в течение нескольких секунд. В таких случаях, постучите по соломе, чтобы освободить диск. Вы также можете перемещать солому вверх и вниз, чтобы освободить диск, или слегка подуть на него. После освобождения бумажный диск обычно отталкивается потертым пластиком. В некоторых случаях требуется 2 или 3 притяжения

[18] [BW12b] и [BW12c].

диска соломой, каждый раз достигая контакта, прежде чем вы сможете наблюдать их взаимное отталкивание.

Чтобы повторить весь этот процесс, диск нужно разрядить. Для этого достаточно прикоснуться к бумажному диску. Нет необходимости держать бумажный диск – достаточно просто прикоснуться к нему и он разрядится заземлением. После этой разрядки еще раз поднесите электризованную солому близко к маятнику. Бумажный диск снова будет притянут соломой. Он коснется соломы и затем оттолкнется от нее.

4.4.1 Объяснение механизма ПКО

Существует простое объяснение этого поведения. Мы проиллюстрируем объяснение механизма ПКО, используя эксперимент 4.3. Предположим, что соломенная или пластиковая линейка отрицательно электризована и что бумажный диск изначально нейтрален, когда он находится далеко от пластика. Диск из бумаги или алюминиевой фольги ведет себя как хороший проводник. Он поддерживается изолирующей нитью из шелка, нейлона или полиэстера. Когда электризованная солома приближается к диску, она поляризуется. Часть диска, которая ближе к потертой соломе, приобретает заряд противоположный по знаку заряду на соломе, в то время как противоположная часть проводника приобретает заряд того же знака, что и заряд на соломе, Рис. 4.12 (a).

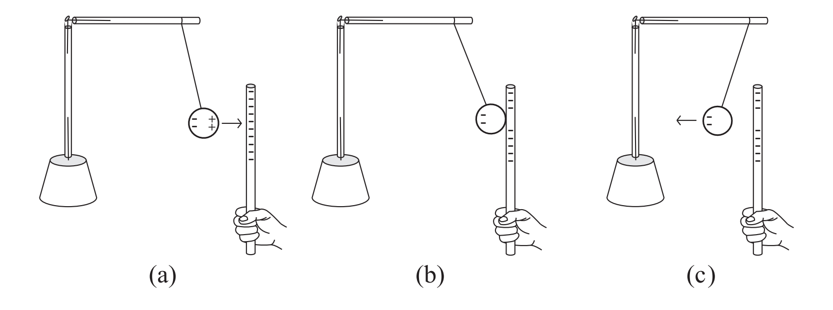


Рис. 4.12: (a) Проводящий диск поляризуется находящейся рядом электризованной соломой. Между ними возникает притяжение. (b) Во время контакта происходит обмен электризованных частиц. В результате этого обмена диск становится электризованным с суммарным зарядом того же знака, что и солома. (c) Электризованный диск затем отталкивается соломой.

Расстояние между положительной частью диска и отрицательной соломой меньше расстояния между отрицательной частью диска и соломой. Электрическая сила между телами, электризованными зарядами противоположных знаков, является притягивающей – и отталкивающей между телами, электризованными зарядами одного знака. Причем интенсивность этих сил возрастает за счет уменьшения расстояния между электризованными телами. Поэтому притяжение положительно электризованной части

диска отрицательной соломой превышает отталкивание, которое она оказывает на противоположную отрицательно электризованную часть проводника. Эти противоположно направленные силы оказывают в сумме притягивающее действие на диск. Когда диск касается соломы, между ними происходит обмен электризованных частиц, что нейтрализует части диска вблизи соломы, а также точки соломы, которые коснулись диска, Рис. 4.12 (б). На этом рисунке нейтрализованная область соломы немного преувеличена. Пластмасса ведет себя как изолятор. Поэтому отрицательные частицы других электризованных областей соломы не движутся. После контакта и диск и солома становятся отрицательно электризованными с суммарным эффектом отталкивания между ними, Рис. 4.12 (c).

4.4.2 Ситуации, когда механизм ПКО не имеет места

Эксперимент 4.4 - *Притяжение между электризованным телом и бумажным диском, прикрепленным к хлопковой нити*

Повторите эксперимент 4.3, используя в этом случае заземленный проводящий диск. С этой целью замените изолирующую нить проводящей нитью, привязанной к проводящей опоре. Затем бумажный диск можно привязать к нижнему концу хлопчатобумажной нити, которая привязана к древесному шампуру или металлической проволоке. Держите один конец шампура рукой, а другой конец – хлопковой нитью. Этот инструмент аналогичен маятниковой нити Грея, описанной в разделе 2.5.

Медленно поднесите потертый кусок пластика близко к этому проводящему маятнику. Маятник наклоняется к соломе, касается ее, оставаясь в прилипшем к электризованной соломе состоянии, Рис. 4.13.

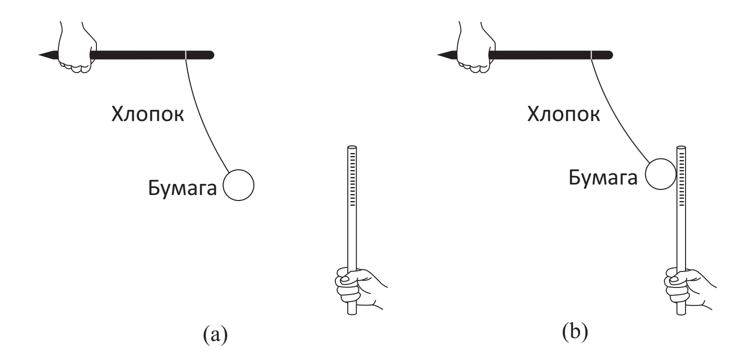


Рис. 4.13: (a) Заземленный проводящий диск притягивается электризованной соломой. (b) Диск касается соломы и прилипает к ней после контакта.

Повторите этот процесс несколько раз. Механизм ПКО здесь не имеет места. То есть, даже когда диск многократно касается электризованной соломы, механизм притяжения, контакта и отталкивания не наблюдается.

Эксперимент 4.5 - *Притяжение между электризованным телом и пластиковым диском*

Повторите эксперимент 4.3, используя в этом случае изолирующий диск пластикового электрического маятника из Рис. 2.12.

Медленно поднесите потертый кусок пластика к пластиковому диску этого маятника. Маятник отклоняется в сторону соломы, Рис. 4.14 (a).

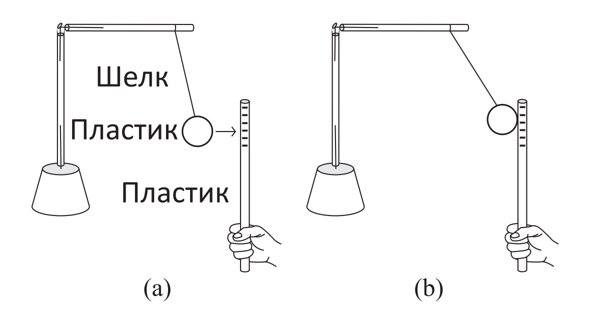


Рис. 4.14: (a) Изолирующий диск пластикового маятника притягивается потертой соломой, (b) касается ее и прилипает к ней.

Если мы разрешим контакт между пластиковым диском и потертой соломой, обычно они остаются приклеенными друг к другу, Рис. 4.14 (b).

———————————————————————————

Эти действия показывают: чтобы механизм ПКО имел место, проводник (бумажный диск) должен быть электрически изолирован от земли (воздухом и изоляционной нитью), как это было в эксперименте 4.3. Когда проводник заземлен, как в эксперименте 4.4, механизм ПКО не будет иметь места, даже если допустить контакт между проводником и электризованной соломой.

Такое поведение тоже можно понять. Заметим сначала, что единственными изоляторами в этом последнем эксперименте были воздух и электризованная пластиковая солома. Все остальные тела вели себя как проводники, а именно: бумажный диск, хлопчатобумажная нить, деревяный шампур и рука, соединенная с землей. Предположим, что солома была отрицательно электризована. Когда она приближается к диску, диск поляризуется. Однако, поскольку это заземленный проводник, его отрицательно электризованные частицы нейтрализуются из-за заземления. Следовательно, диск становится положительно электризованным вблизи соломы, Рис. 4.15 (a).

Когда бумажный диск касается соломы, между ними происходит обмен электризованных частиц, стремящихся нейтрализовать диск и точки соломы, которые коснулись его. Поскольку солома является изолятором, ее другие электризованные частицы не двигаются, оставаясь на своих местах. Эти отрицательные частицы, которые остались в электризованной соломе, продолжают оказывать привлекающую силу на свободные электризованные

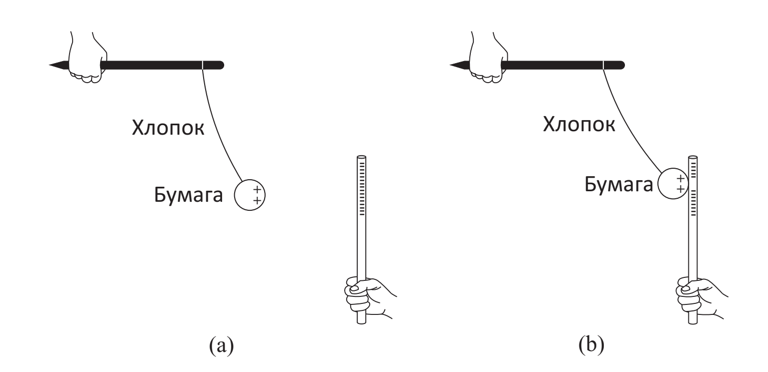


Рис. 4.15: (a) Заземленный диск положительно электризован вблизи отрицательной соломы. (b) Заземленный проводник остается положительно электризованным вблизи соломы, будучи притянутым отрицательными участками изолирующей соломы.

частицы проводящего диска. Эти силы притяжения стремятся снова поляризовать диск, оставляя его положительным в области контакта и отрицательным с противоположной стороны. Из-за заземления противоположная сторона диска становится нейтральной. Остается только положительная область вблизи отрицательной соломы, Рис. 4.15 (b). На этом рисунке мы увеличили непропорциально нейтральную область соломы, которая находится в контакте с диском.

Следует подчеркнуть, что механизм ПКО также не имеет места для небольшого изолятора, который притягивается электризованным телом, как это наблюдалось в эксперименте 4.5. Пластиковый диск может быть слегка притянут электризованной соломой и может даже коснуться ее. Тем не менее, диск будет оставаться прикрепленным к электризованной соломе после контакта, даже после повторения этой процедуры несколько раз.[19]

4.5 Важность открытия проводников и изоляторов Стивеном Греем

Самая ранняя ссылка на так называемый янтарный эффект относится к работе Плато *Timaeus* (около 428-348 до н.э.).[20] В течение двух тысяч лет это было почти все, что было обнаружено об электричестве. По сути, люди знали только, что янтарь и несколько других веществ обладают способностью притягивать легкие тела после потирания. В 1729 году Стивен Грей понял, что существуют два сорта тел, которые называются проводниками и изоляторами. Он также получил некоторые из основных свойств проводников и изоляторов. Он опубликовал свои результаты в 1731 году в одной

[19] Раздел 7.6 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

[20] [Pla52, Разделы 79 to 80, стр. 470-471], [Pla09, Разделы 79 и 80, стр. 163-165] и раздел 2.2 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

из самых важных работ в истории электричества.[21] В томе 1 этой книги подробно обсуждается статья Грея.[22]

Основополагающее открытие Грея позволило манипулировать электрическими явлениями. Он определил механизм заземления для разрядки электризованного проводника. Ему удалось электризовать металлы, воду и человеческий организм. С этой целью эти материалы были изолированы от земли. Он мог передавать электричество (или силу притяжения легких тел) в места, расположенные далеко от места трения. С этой целью он использовал проводящие шнуры и провода, изолированные от земли. Когда электризованная стеклянная трубка поддерживалась в контакте с концом этой проводящей струны или рядом с ней, свободный конец струны (или прикрепленный к ней проводник) также мог бы притягивать расположенные рядом с ним легкие тела. Он также первым продемонстрировал, как хранить электричество, то есть как продлить время, в течение которого тело остается электризованным. Он создал первые электреты (диэлектрические материалы с постоянной электростатической дипольной поляризацией или с постоянной электризацией), как обсуждается в разделе 13.4. Материалы с постоянной дипольной поляризацией также называются магнитами электричества.[23] Он также был одним из первых ученых, проводивших эксперименты, связанные с сохранением электрических зарядов.[24]

Дюфе, следуя по стопам Грея, распознал отталкивание как электрическое явление и обнаружил механизм ПКО.[25] Когда он обнаружил аномалию в этом механизме (то есть ситуацию, когда это правило не работало), он пришел к выводу о существовании двух видов электричества, которые он назвал стекловидным и смолистым типами электричества.[26] До него был известен только один вид электричества. В настоящее время эти два вида электричества называются положительными и отрицательными электричествами, соответственно. Говорят также о *положительных и отрицательных электрических зарядах* или что *тела электризованы положительно и отрицательно.*

После открытия Грея наука об электричестве начала развиваться головокружительными темпами. То, что сделало возможным все эти новые открытия, – это знание об этих двух типах тел в природе, а именно: проводники и изоляторы наряду с их основными свойствами. В наши дни это знание кажется тривиальным. В любом случае, именно отсутствие знания о существовании двух существенно разных типов тел не позволяло продвинуться в изучении электричества в течение двух тысяч лет. В 2012 году мы опубликовали полный перевод работ Грея по электричеству на португальский язык с комментариями, где мы воспроизводим его основные экспери-

[21] [Graf], [Bos11, Chapter 6] и [BAC12, Chapter 7, стр. 127-169].

[22] Приложение B в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17]. Смотри также [RP13a], [RP13b], [RP13c], [Rai15], [RP15b], [RP15a] и [RP16].

[23] [Net94], [Sil10b], [Sil10a], [Bos11, глава 8, стр. 226-248] и [BAC12, Chapter 19, стр. 373-392].

[24] раздел 6.10 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

[25] раздел 4.8 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

[26] [DF33b], [DF] и [BC07].

менты с использованием недорогих материалов.[27]

[27][BAC12].

Глава 5

Электризация клейких лент

В этой главе описываются эксперименты, относящиеся к любопытному явлению, а именно: электризация клейких лент.[1]

5.1 Изолирующее и проводящее поведение ленты

Эксперимент 5.1 - *Изолирующее поведение ленты в продольном направлении*

Начните с катушки обычной клейкой ленты шириной 1 или 2 см. Это может быть офисная лента PSA, прозрачная лента, липкая лента, целлофановая лента и т. д. Проанализируйте ее проводящие и изолирующие свойства. Клейкая липкая сторона будет представлена начальной буквой G слова «клей» на английском языке, а гладкая или гладкая сторона будет представлена буквой S. Сначала зарядите электроскоп, Рис. 5.1 (a).

Рассмотрим полоску ленты длиной около 10-20 см. Держите концы руками. Прикоснитесь гладкой стороной к краю заряженного электроскопа. Полоска электроскопа остается поднятой, Рис. 5.1 (b). То же самое происходит, когда липкая сторона ленты касается края заряженного электроскопа, Рис. 5.1 (c).

Этот эксперимент показывает, что обе стороны липкой ленты ведут себя как изоляторы вдоль их длины. Хотя лента заземлена рукой, электроскоп не разряжается.

Эксперимент 5.2 - *Лента проводит в поперечном направлении*

Начните эксперимент снова с заряженного электроскопа, Рис. 5.2 (a).

Держите клейкую ленту с обоих концов. Прикоснитесь центром гладкой стороны ленты к краю электроскопа. Его полоса остается поднятой, Рис.

[1] [Jef59], [Bea96], [CS02, Chapter 14], [Mor04b], [Mor04a] и [Vas05].

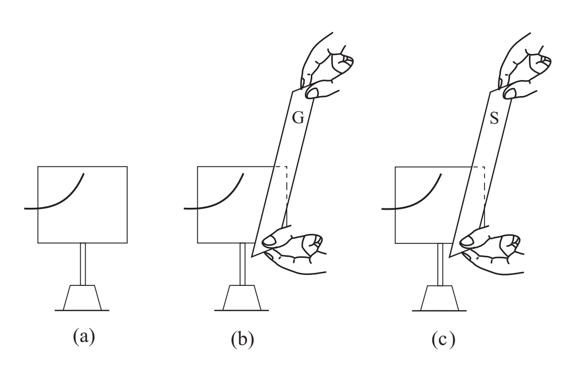


Рис. 5.1: (a) Заряженный электроскоп. (b) Гладкая, т. е. нелипкая, сторона ленты касается края электроскопа. Полоска остается поднятой. (c) Она также остается поднятым, когда клейкая сторона ленты касается картона.

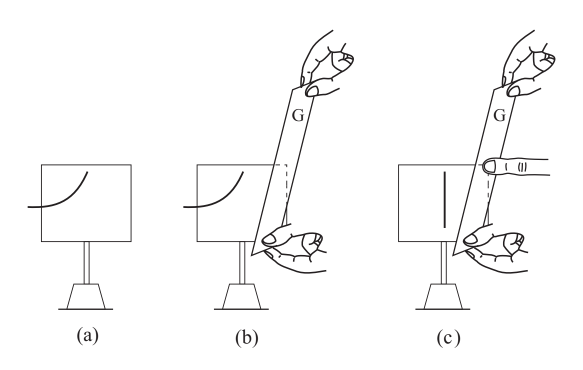


Рис. 5.2: (a) Заряженный электроскоп. (b) Гладкая сторона ленты касается края картона, и полоса остается поднятой. (c) При касании пальцем другой стороны ленты полоска падает.

5.2 (b). Затем другой человек касается пальцем середину другой стороны ленты. Лента должна при этом оставаться между краем картона и пальцем. Палец не должен касаться картона. В этом случае полоса падает через несколько секунд, Рис. 5.2 (c).

Полоска заряженного электроскопа также падает, когда клейкая сторона ленты касается края картона, а палец касается гладкой стороны ленты.

Затем электроскоп разряжается, когда одна сторона клейкой ленты касается края картона, а палец касается другой стороны ленты. Поэтому вдоль ширины липкая лента ведет себя как проводник в электростатических экспериментах, хотя она ведет себя как изолятор в продольном направлении.

Эксперимент 5.3 - *Несколько наложенных лент*

Наложите несколько кусков ленты одинаковой длины поверх друг друга, образуя многослойную полоску. Приклейте полоску ленты длиной 10-20

см на поверхность стола. Приклейте сверху несколько слоев, все одинаковой длины. Затем повторите эксперимент 5.2 с этой многослойной полосой. Коснитесь одной стороной многослойной полосы край заряженного электроскопа. Затем коснитесь пальцем противоположную сторону этой полосы. Измерьте интервал времени разрядки электроскопа. Таблица 5.1 дает типичный результат.

Количество перекрывающихся слоев	Интервал времени разряда
1	1-5 с
5	5 с
10	10 с
15	15-20 с
20	25-60 с

Таблица 5.1: Приблизительные временные интервалы для разрядки электроскопа.

Согласно определению 3.5, мы заключаем, что 20 наложенных друг на друга слоев ленты можно считать изолятором в направлении, ортогональном этим слоям. Эта ситуация представлена на Рис. 5.3.

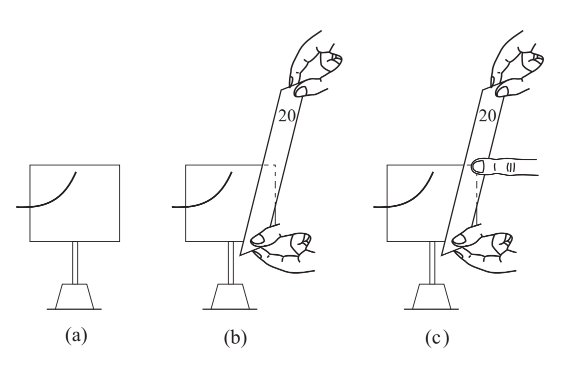


Рис. 5.3: (a) Заряженный электроскоп. (b) Одна сторона 20-ти многослойной ленты касается края картона, и полоса остается поднятой. (c) Полоска остается поднятой, когда палец касается внешней стороны этой многослойной ленты.

Этот эксперимент еще раз иллюстрирует предмет, обсуждаемый в подразделе 3.3.4. То есть, проводящее (изолирующее) свойство тела зависит не только от его природы, но и от его длины и толщины. В настоящем эксперименте, чем толще многослойная лента, тем больше она будет вести себя как изолятор.

Эксперимент 5.4 - *Другие типы лент*

Повторите эксперименты 5.1 и 5.2 с другими видами липкой ленты.

Хирургическая или медицинская лента, например, ведет себя как проводник не только по ширине, но и по ее длине. Хотя обычная офисная лента выполнена из изоляционного пластика, хирургическая лента обычно изготовлена из хлопка, т. е. проводящего материала.

С другой стороны, электрическая лента (также называемая изоляционной лентой) ведет себя как большинство клейких лент. То есть как изолятор вдоль длины и как проводник вдоль ширины. Обычно она черного цвета и изготовлена из винила или ПВХ.

Увеличивая количество наложенных друг на друга слоев электрической ленты, мы также увеличиваем ее изолирующее действие по толщине. Лента с 15-тю или 20-тю слоями может считаться хорошим изолятором по толщине, как показано на Рис. 5.3.

Эксперимент 5.5 - *Изолирующее поведение ленты по длине при низких напряжениях*

Поведение электрической ленты в эксперименте 5.4 может удивить многих людей. В конце концов, эту ленту обычно называют «изоляционной лентой». Однако по своей ширине она ведет себя как проводник в электростатических экспериментах (электроскоп разряжается через поперечную сторону ленты). Мы проведем два новых эксперимента, чтобы понять это поведение.

Повторите эксперимент 3.9. Лампочка включается, когда проводящие концы A и B непосредственно связаны друг с другом, Рис. 5.4 (a). То же самое происходит, когда A и B связаны через металлический провод.

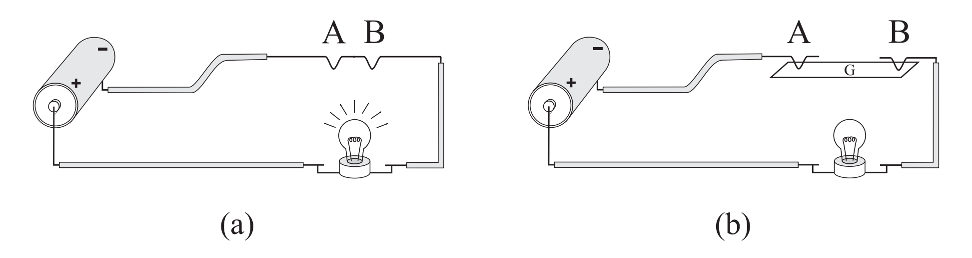


Рис. 5.4: (a) Лампочка включается, когда проводники A и B касаются друг друга. (b) Лампочка не включается, когда A и B, разделенные на 2 или 5 см, касаются двух центральных точек на липкой стороне ленты.

Поместите ленту длиной от 2 до 5 см между проводящими точками A и B, причем эти точки касаются центра липкой стороны ленты. Клейкая лента, хирургическая лента и электрическая лента ведут себя как изоляторы в этом эксперименте, как показано на Рис. 5.4 (b). То же самое происходит, когда A и B касаются двух точек гладкой стороны ленты с интервалом в 2 или 5 см.

Все эти ленты ведут себя как изоляторы по длине при низких напряжениях.

Эксперимент 5.6 - *Изолирующее поведение поперек ленты при низких напряжениях*

Проверьте, как эти ленты ведут себя по ширине. Сначала соедините A и B напрямую, чтобы убедиться, что лампа включается и что все электрические соединения работают исправно, Рис. 5.5 (a).

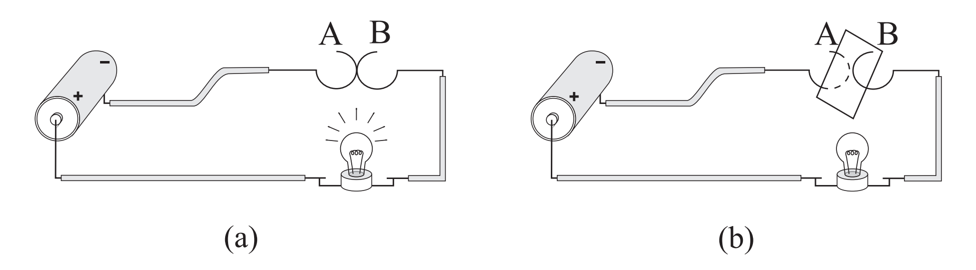


Рис. 5.5: (a) Лампочка включается, когда проводники A и B касаются друг друга. (b) Лампочка не включается, когда A касается одной стороны ленты, а B касается другой ее стороны.

Затем поместите кусок ленты в вертикальной плоскости так, чтобы точка A касалась центра одной стороны ленты, а точка B – центра другой ее стороны. Лампа не включается ни для одного типа ленты (клейкая, хирургическая или электрическая), Рис. 5.5 (b).

Эксперимент 5.4 показывает, что электрическая лента ведет себя как проводник по ширине в электростатических явлениях, где разность потенциалов между двумя сторонами ленты составляет 1000 В или выше. Эксперимент 5.6, с другой стороны, показывает, что электрическая лента ведет себя как изолятор по ширине для низких напряжений в несколько вольт. Эта лента также является хорошим изолятором, когда падение напряжения по ширине достигает примерно 300 вольт. Поэтому ее называют *изолирующей* или *электрической* лентой.

Эти эксперименты также иллюстрируют тему, которая обсуждается в подразделе 3.3.2. То есть проводящее или изолирующее поведение тела зависит не только от внутренних свойств тела, но и от внешней разности потенциалов, приложенной к этому телу.

5.2 Электризация ленты

Чтобы стандартизировать эксперименты и их результаты, проверяемая полоска всегда должна быть отделена от другой, находящейсяпод ней полосы, называемой базовой лентой и обозначаемой буквой B. Приклейте полоску ленты длиной 10-20 см на гладкую ровную поверхность стола. Эта базовая лента должна быть сглажена пальцем. Другая полоса равной длины должна быть прикреплена поверх базовой ленты. Она будет называться верхней лентой и представлена буквой U, Рис. 5.6.



Рис. 5.6: Верхняя лента U поверх базовой ленты B.

Сложите один конец, чтобы легче было с ней обращаться. Верхнюю ленту следует также сгладить пальцем.

Эксперимент 5.7 - *Притяжение лентой легких тел*

Разряженный электроскоп на столе, Рис. 5.7 (a).

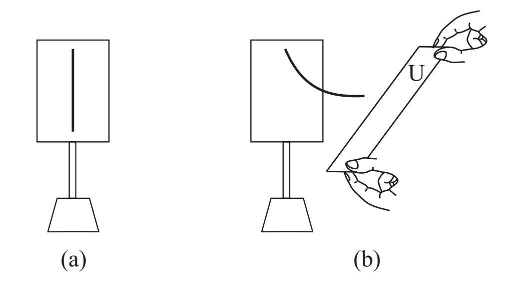


Рис. 5.7: (a) Разряженный электроскоп. (b) Верхняя лента U притягивает полоску электроскопа.

Необходимо подготовить ленты B и U, Рис. 5.6. Возьмите верхнюю ленту за сложенный конец и *быстро* потяните ее вверх и оторвите от базовой ленты. Базовая лента должна оставаться прикрепленной к столу. Удерживая ленту U за ее концы, поднесите ее ближе к нижней части полоски электроскопа. Полоса притягивается лентой, Рис. 5.7 (b).

Эта верхняя лента также поворачивает металлический версориум при приближении к нему. Держите ленту вертикально за ее концы и поднесите ее к одной ноге версориума. Версориум повернется, указывая стрелкой на ленту. При перемещении ленты вокруг версориума, его стрелка будет поворачиваться, указывая все время на текущее положение ленты.

Этот эксперимент показывает, что верхняя лента стала электризованной в результате ее быстрого отрыва от базовой ленты. Эти явления с притяжением аналогичны янтарному эффекту, раздел 1.1. Этот эксперимент также иллюстрирует, что лента ведет себя как изолятор вдоль длины. Действительно, хотя она была заземлена через удерживающую ее руку, она не разрядилась.

Эксперимент 5.8 - *Лента притягивается нейтральными в исходном состоянии проводниками*

Оторвите еще одну ленту U *резко* от базовой ленты. Повесьте ее за один конец на карандаш, ручку или на край стола. Лента должна висеть вертикально, Рис. 5.8 (a) и (b).

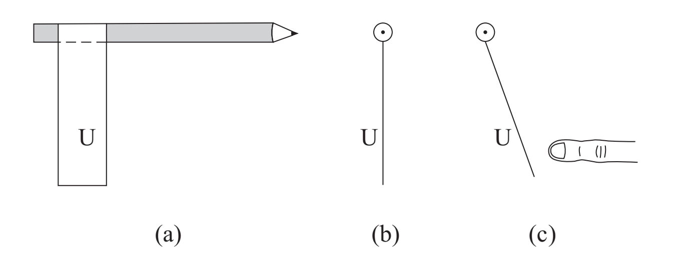


Рис. 5.8: (a) Вид сбоку висящей верхней ленты. (b) Вид сзади. (c) Лента притягивается близко расположенным пальцем.

Поднесите палец к нижней части висящей ленты в направлении, перпендикулярном плоскости ленты. Лента притягивается пальцем, Рис. 5.8 (c). Лента не должна касаться пальца. Это притяжение происходит не только тогда, когда палец приближается к клейкой стороне G ленты, но также и при приближении к гладкой стороне S.

Этот эксперимент также показывает, что липкая лента электризовалась при ее резком отрыве от базовой ленты. Это явление противоположно янтарному эффекту. Оно иллюстрирует принцип действия и противодействия.[2] В янтарном эффекте электризованное тело привлекает легкие объекты, которые изначально были нейтральными. Сильное притяжение имеет место, когда эти легкие объекты ведут себя как проводники. В противоположном явлении, наблюдаемом здесь, первоначально нейтральное тело (палец) привлекает наэлектризованные объекты (например, висящую ленту U), которые находятся рядом с ним. В ходе притяжения, палец заряжается. Теперь он имеет электрический заряд со знаком противоположным заряду на электризованной ленте.

Попробуйте эксперименты 5.7 и 5.8 с разными видами или марками клейких лент, всегда используя одну и ту же ленту для каждой пары BU. В следующих экспериментах нужно использовать тип ленты, который сильнее всего электризуется.

Эти эксперименты хорошо работают в сухую погоду.

Вероятно, при отрыве от базовой ленты, верхняя лента электризовалась на ее клейкой стороне G. Ведь перед отрывом от базовой ленты, она была сглажена пальцем, т. е. проводящим телом.

Эксперименты раздела 5.1 показали, что клейкая лента ведет себя как проводник по ширине. Поэтому при ее отрыве от базовой ленты, может происходить обмен электризованными частицами между клейкой и гладкой сторонами заряженной верхней ленты. Может случиться так, что через несколько секунд после отрыва от базовой ленты, обе стороны верхней ленты станут электризованными. В любом случае, мы не будем проверять в этой книге, происходит ли электризация только на липкой стороне или на обеих сторонах.

[2] Раздел 3.5 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

Эксперимент 5.9 - *Определение знака зарядов на электризованной ленте*

Электризуйте два электроскопа противоположными зарядами. Это можно сделать путем индукции, например.[3] Эти заряженные электроскопы должны оставаться на столе на некоторм расстоянии друг от друга с поднятыми полосками. Обратите внимание, какой из них положительно заряжен, а какой – отрицательно.

Резко оторвите еще одну ленту U от базовой ленты B. Держа горизонтально за концы, поднесите ее к нижней части полосок обоих электроскопов, не касаясь их. Она привлекает одну полоску и отталкивает другую. Зная знак заряда электризованных электроскопов, определите знак зарядов на ленте U. В большинстве экспериментов, которые мы проводили, большинство марок лент давали *отрицательно* электризованные верхние ленты. Эти ленты отталкивали полосу отрицательного электроскопа и притягивали полосу положительного электроскопа.

В зависимости от типа клейкой ленты верхняя лента может стать положительно электризованной.

5.3 Нейтрализация ленты

В этом разделе мы опишем, как нейтрализовать электризованную ленту.

Эксперимент 5.10 - *Разрядка ленты со временем*

Предположим, что верхняя лента стала электризованной, как описано в разделе 5.2. Повесьте ее вертикально на подходящую поддержку, Рис. 5.8 (a) и (b).

Самый простой способ разрядить ленту – оставить ее надолго в открытом воздухе. После этого, при поднесении пальца к нижней части ленты, он больше не привлекает ленту. Аналогично, когда эта лента подносится к нижней части полосы разряженного электроскопа, полоса больше не притягивается лентой. Точно так же, металлический версориум не поворачивается этой лентой.

Эксперимент 5.11 - *Разрядка ленты через ее гладкую сторону*

Теперь опишем еще одну процедуру для разрядки верхней ленты. Оторвите новую ленту U от ленты B. Повесьте ее вертикально на краю стола или на карандаше, как показано на Рис. 5.8 (a) и (b). Держите нижнюю часть ленты и медленно потрите пальцем вперед и назад вдоль *гладкой* стороны ленты, Рис. 5.9.

Затем проверьте ее электризацию, как в экспериментах 5.7 и 5.8. Обычно эта лента больше не привлекает полосу разряженного электроскопа, она не поворачивает версор и не притягивается пальцем.

[3] Раздел 7.5 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

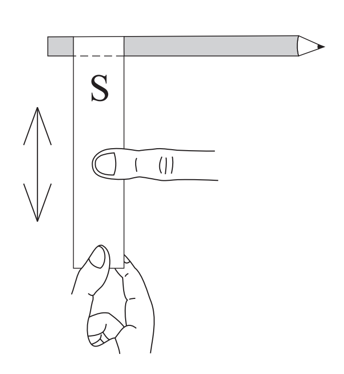


Рис. 5.9: Потирание *гладкой* стороны ленты.

Эксперимент 5.12 - *Трудно разрядить ленту через ее липкую сторону*

Начните эксперимент снова с висящей электризованной ленты. Повторите процедуру эксперимента 5.11, но на этот раз потрите пальцем вдоль *липкой* G стороны ленты. Затем проверьте ее электризацию, как в экспериментах 5.7 и 5.8. Обратите внимание, что на этот раз лента остается электризованной.

Результаты экспериментов 5.11 и 5.12 несколько неожиданны. В конце концов, лента U сначала должна была зарядиться на липкой стороне при ее отрыве от базовой ленты. Поэтому мы могли ожидать ее разрядки, потирая пальцем ее липкую сторону G. Однако нейтрализация в этом случае не происходит. Возможно это связано с тем, что клей предотвращает плавное скольжение пальца вдоль стороны G. В результате, мы не коснулись некоторых точек на этой стороне ленты и не заземлили их. Возможно, лента нейтрализацуется только в тех точках, где палец касается клея, оставаясь электризованной в других точках. Кроме того, палец, при отрыве от клея, может заряжать ленту заново.

Эксперимент 5.11, с другой стороны, показал, что ленту можно разрядить, скользя пальцем вдоль ее гладкой стороны. Одна из возможных причин, почему нейтрализация имеет место в этом случае, связана с экспериментом 5.2, который указывает, что лента ведет себя как проводник в поперечном направлении. Поэтому, скользя проводящим пальцем вдоль гладкой стороны, электризованные частицы, расположенные с обеих сторон ленты, нейтрализуются. Кроме того, палец может скользить по всей площади гладкой стороны, касаясь большинства точек ленты. Такое всеохватывающее заземление не происходило на липкой стороне, так как клей предотвращал скользящее движение пальца.

Эксперимент 5.13 - *Разрядка половины ленты*

Подготовьте новую электризованную ленту U длиной приблизительно 20 см. Повесьте ее за один конец и медленно погладьте пальцем по ее гладкой

стороне, как на Рис. 5.9, но только вдоль нижней половины ленты. Удалите палец.

Снова поднесите палец вплотную к центру потертой части ленты, примерно на расстоянии 5 см от нижнего свободного конца. Лента больше не притягивается пальцем. Ленту можно также удерживать горизонтально. Когда центр потертой части ленты приближается к нижнему концу полосы разряженного электроскопа, никакого притяжения не происходит. Эта потертая часть ленты не взаимодействует также с находящимся рядом версориумом.

Поднесите центр той части ленты, которая не была потерта, близко к нижнему концу полосы разряженного электроскопа. Полоска притягивается лентой. Эта часть ленты также поворачивает близлежащий версориум. Повесьте ленту на другой конец, на этот раз с потертой частью наверху. Поднесите палец близко к центру нижней части ленты, которая не была потерта. Этот участок ленты притягивается пальцем.

Этот эксперимент демонстрирует несколько фактов. Мы начали с ленты, наэлектризованной по всей ее длине, и потерли только половину ее. Скользя пальцем вдоль гладкой стороны этой наэлектризованной ленты, мы нейтрализовали эту область. Другая половина ленты, которой палец не касался, не был разряжен. Этот факт снова показывает, что клейкая лента ведет себя как изолятор в продольном направлении. То есть только половина ленты остается электризованной вдоль нее. Находящиеся на этой части электризованные частицы не могут переместиться в продольном направлении к другой половине ленты.

5.4 Электризация ленты противоположными зарядами

Подготовьте еще один набор лент, на этот раз с тремя лентами поверх друг друга. Нижняя базовая лента B длиной от 10 до 20 см должна быть приклеена к гладкой ровной поверхности. Сгладьте ее пальцем. Прилепите вторую полоску к базовой ленте. Сложите один конец и сгладьте вторую ленту вдоль ее длины. Приклейте третью полоску на вторую ленту. Сложите один конец и сгладьте эту ленту тоже вдоль ее длины. Вторая полоса называется нижней лентой и представлена буквой L, которая должна быть написана на ее конце. Третья полоска называется верхней лентой и представлена буквой U на ее конце. Сложенные концы ленты L и U должны быть наложены друг на друга. Рис. 5.10 иллюстрирует этот набор из 3 лент.

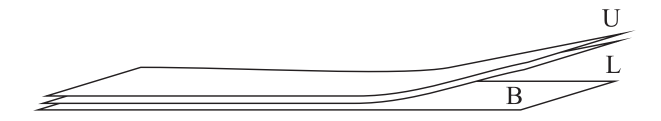


Рис. 5.10: Лента U наложена на ленту L, которая лежит поверх ленты B.

Эксперимент 5.14 - *Нейтральность наложенной пары лент*

Ленты U и L нужно вместе оторвать *медленно* от базовой ленты. Лента B должна оставаться прикрепленной к столу. Повесьте двойной слой ленты, чтобы он свисал вертикально с подходящей опоры. Пропустите этот двойной слой несколько раз между двумя пальцами, разрядив пару.

Затем поднесите пару лент LU близко к полоске разряженного электроскопа. Полоса не притягивается, Рис. 5.11.

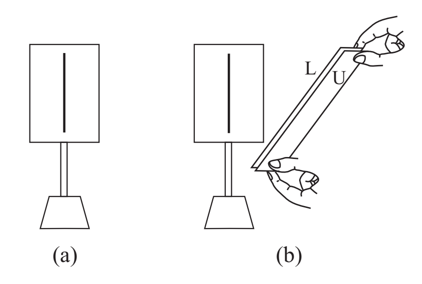


Рис. 5.11: (a) Разряженный электроскоп. (b) Нейтральная пара лент LU не притягивает полосу разряженного электроскопа.

Повесьте пару лент LU вертикально на подходящую поддержку, Рис. 5.12 (a) и (b). Поднесите палец близко к нижней части этой пары. Притяжение не наблюдается, Рис. 5.12 (c).

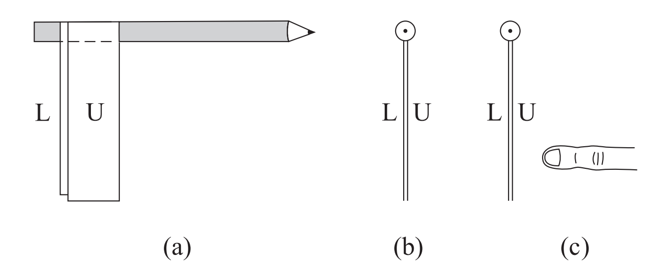


Рис. 5.12: (a) Вид сбоку висящей пары LU. (B) Вид сзади. (c) Пара не притягивается находящимся рядом пальцем.

Иногда пара, после отрыва от базовой ленты и разглаживания между двумя пальцами, притягивает полосу разряженного электроскопа и притягивается к пальцу. В таких случаях пара должна быть нейтрализована перед продолжением экспериментов. Чтобы нейтрализовать пару, повесьте ее вертикально и подождите несколько минут. Или пропустите ее медленно еще несколько раз между двумя пальцами. Медленно потрите пальцем назад и вперед вдоль гладкой стороны ленты U, как показано на Рис. 5.9.

С этого момента предполагается, что пара LU является нейтральной. То есть он больше не притягивает легкие тела и не притягивается заземленными проводниками.

Эксперимент 5.15 - *Притяжение и отталкивание между электризованными лентами*

Начните с нейтральной пары LU, как в эксперименте 5.14. Держите сложенный конец ленты L одной рукой, а сложенный конец ленты U – другой. Затем *быстро* оторвите ленту U от ленты L. Повесьте каждую ленту вертикально на подходящую опору, причем опоры должны быть отделены друг от друга.

С помощью процедур, аналогичных экспериментам 5.7 и 5.8, убедитесь, что каждая лента электризована.

Повторите эту процедуру с новой нейтральной лентой LU и подготовьте еще одну пару электризованных лент L и U.

Поднесите один горизонтальный карандаш сбоку к другому карандашу близко, каждый карандаш с лентой U. Карандаши могут даже касаться друг друга. Обратите внимание, что ленты отталкиваются друг от друга, Рис. 5.13 (a). Две электризованные ленты L также отталкивают друг друга, Рис. 5.13 (b). Однако нижняя лента притягивает верхнюю ленту, Рис. 5.13 (c).

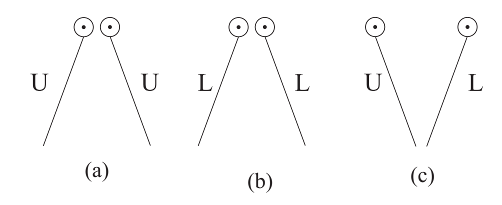


Рис. 5.13: (a) Отталкивание между двумя лентами U. (b) Отталкивание между двумя лентами L. (c) Притяжение между нижней лентой и верхней лентой.

Ленты U и L теперь противоположно электризованы – один положительно, а другой отрицательно.

Уменьшение расстояния между горизонтальными карандашами, несущими ленты U, увеличивает угол наклона лент относительно вертикали. Этот факт иллюстрирует, что сила отталкивания тел, электризованных зарядами одного знака, возрастает при уменьшении расстояния между взаимодействующими телами. То же самое происходит при уменьшении расстояния между двумя лентами L, а ткже между нижней лентой и верхней лентой.

Эксперимент 5.16 - *Определение знака заряда на каждой ленте*

Повесьте электризованную нижнюю ленту вертикально на подходящую опору, а электризованную верхнюю ленту на другую подходящую опору. Эти две опоры должны быть отделены друг от друга. Потрите пластиковую соломку волосами или листом бумаги, чтобы она стала отрицательно электризованной. Поднесите ее горизонтально к нижней части обеих лент.

Для большинства лент, с которыми мы работали, верхняя лента отталкивалась соломой, в то время как нижняя лента притягивалась к ней.

Солома приобретает достаточно большое количество положительного заряда при потирании между двумя жесткими резиновыми шлангами или между двумя трубками из ПВХ.[4] Поднесите эту положительную солому близко к двум электризованных лентам. Она отталкивает нижнюю ленту и притягивает верхнюю.

Теперь можно заключить, что обычно верхняя лента становится отрицательно электризованной, а нижняя лента становится положительно электризованной, Рис. 5.14.

U	=	− − − − −
L	=	+ + + + +

Рис. 5.14: Верхняя лента электризована отрицательно, а нижняя — положительно.

5.5 Электрические диполи

Электрический диполь состоит из двух равных и противоположно наэлектризованных частиц, разделенных определенным расстоянием. Тело с нулевым общим зарядом, имеющее равное количество положительных и отрицательных зарядов, разделенных вдоль его объема, также называется электрическим диполем. В этом разделе мы покажем, как создавать электрические диполи и некоторые явления, которые можно наблюдать с ними. Взаимодействие между двумя электрическими диполями имеет много свойств, аналогичных взаимодействию между двумя магнитами.

Эксперимент 5.17 - *Электрический диполь, изготовленный из клейких лент*

Подготовьте теперь электрический диполь, начиная с пластического версориума, как описано в подразделе 2.3.3. Предположим, что каждое плечо этого версориума имеет длину приблизительно 5 см. Предположим также, что обе плечи изначально нейтральны. Это можно проверить, поднося палец к каждому плечу. Если версориум не поворачивается пальцем, плечи можно считать нейтральными. Подготовьте набор из трех наложенных лент (называемых B, L и U), как на Рис. 5.10, каждая длиной 4 см. Затем ленты L и U следует наэлектризовать противоположными зарядами, как в эксперименте 5.15. Прикрепите ленту L на одно плечо версориума, а ленту U – на другое, Рис. 5.15 (a).

[4] Раздел 5.3 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

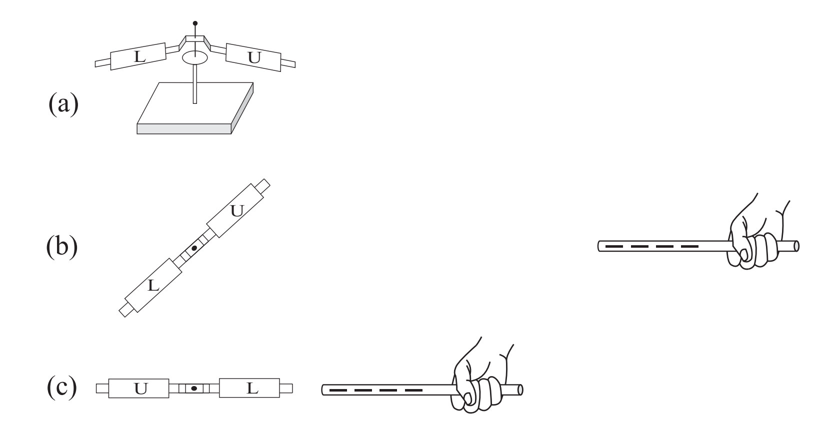


Рис. 5.15: (a) Пластиковый версориум с электризованной лентой L на одном плече и электризованной лентой U на другом. (b) Вид сверху на версориум в произвольной ориентацией, когда электризованная солома находится далеко от него. (c) Версориум ориентирован на электризованную соломку, расположенную рядом с ней.

Когда отрицательная солома приближается к любой из двух плеч, версориум поворачивается и указывает на соломку. Более того, плечо U отталкивается соломой, в то время как плечо L притягивается к ней. В равновесии версориум ориентируется, как показано на Рис. 5.15 (c).

Этот электрический диполь имеет противоположные заряды одинаковой величины на разных ножках версориума. Он аналогичен обычному магнитному компасу и может быть назван электрическим компасом.[5] Взаимодействие между двумя поляризованными пластиковыми вертушками ведет себя как взаимодействие между двумя магнитными компасами.

Однако, когда обычный компас поворачивается Землей и находящимся рядом магнитом, этот электрический диполь ориентируется не только другим электрическим диполем, но и соломой, электризованной одним зарядом (положительным или отрицательным). Магнит не похож на электризованную соломку. То есть мы не знаем какого-либо материала в природе, содержащего только один тип «магнитного заряда». Например, нет вещества, содержащего только северный полюс. При разбиении стержневого магнита посередине, каждая половина получит северный и южный полюс, Рис. 5.16.

Этот эксперимент не работает должным образом, когда клейкие ленты закреплены на металлическом версориуме. Есть две возможные причины. (a) Первая причина состоит в том, что этот версориум является проводником. Клейкая лента также ведет себя как проводник по ширине. Поэтому электризованные частицы на обеих лентах могут нейтрализовать друг друга через проводящий версориум.

(б) Есть вторая причина, которая затрудняет проведение этого экспери-

[5] [Net94] и [CS02, стр. 466].



Рис. 5.16: (a) Брусок магнита. (b) Разламывая магнит, мы получаем два новых магнита. Каждый из них имеет северный полюс и южный полюс.

мента с помощью металлического версориума (даже когда нейтрализация не происходит, и обе ленты сохраняют свои противоположные заряды). Металлический версориум – проводник. Поэтому, когда электризованная солома приближается к одной из ее ножек, эта нога получит индуцированный заряд противоположного знака. Затем она будет притянута соломой, пытаясь повернуть версориум. Между этой ногой и соломой возникает сильная притягивающая сила. В конечном итоге эта сила притяжения может превысить силу, которая действует между каждой лентой и соломой. Тогда обе стороны версориума будут притянуты соломой, хотя и силами разной величины. Предположим, например, что солома отрицательная, лента на левой ноге положительная, а лента на правой ноге отрицательная. Когда солома приближается к левой ноге, кончик этой ноги станет положительным. Поэтому солома будет притягивать эту металлическую ножку и зафиксированную на ней ленту. Поднесите солому близко к правой ноге. Кончик этой ноги также станет положительным. Теперь солома будет притягивать эту металлическую ногу из-за индуцированных на ней зарядов, в то время как она будет отталкивать фиксированную на ней отрицательную ленту. Полная сила притяжения, действующая на левую ногу, будет больше, чем результирующая сила притяжения, действующая на правую ногу, в предположении одинакового расстояния между соломой и каждой ногой. Этот факт немного усложняет анализ вращения металлического версориума.

Эксперимент 5.18 - *Другие виды электрических диполей*

Эксперимент 5.17 имел электрический диполь, изготовленный с использованием клейких лент. Следующий эксперименте описывает другие виды электрических диполей.

Трибоэлектрический ряд, Таблица 1.1, показывает, что пластиковая солома становится отрицательно электризованной при трении волосами, кожей, бумагой или хлопком. Она приобретает достаточно большое количество положительного заряда при потирании между двумя жесткими резиновыми шлангами или между двумя трубами из ПВХ. Для этого поместите один конец соломы между этими хорошо спрессованными частями и быстро вытащите его из резиновых шлангов.

Начните с нейтральной соломы в виде перевернутой буквы V. Повесьте ее на шелковую нить, проходящую через ее центр. Потрите половину этой соломы бумажной салфеткой. Эта часть соломы становится отрицательно электризованной. Быстро вытащите вторую половину соломы, зажатую

между двумя резиновыми шлангами. Эта половина соломы становится положительно электризованной. Солома теперь поляризована, хотя обе ноги могут приобретать заряды разной величины, как показано на Рис. 5.17 (a). В этой ситуации солома имеет отличный от нуля суммарный заряд. Электрический диполь формируется, когда обе ноги одинаково электризуются противоположными зарядами, Рис. 5.17 (b).

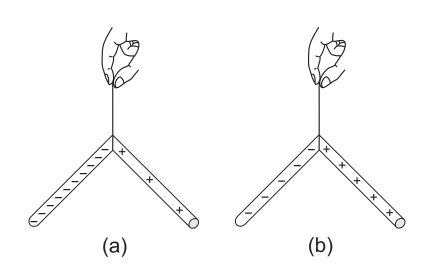


Рис. 5.17: (a) Отрицательная нога электризована больше, чем положительная. (b) Ноги одинаково наэлектризованы противоположными зарядами.

Диполь поварачивается, когда отрицательная акриловая линейка приближается к любой из двух ног.

Сделайте еще один вид электрического диполя, используя брусок пенополистирола, имеющий, например, размеры $2 \times 2 \times 7$ см или $0.5 \times 0.5 \times 5$ см.[6] Точный размер не так важен. Согласнно трибоэлектрическому ряду Таблицы 1.1, пенополистирол становится отрицательным при трении волосами, кожей или бумагой. Он становится положительным при трении пластиковым пакетом или жесткой акриловой пластинкой. Потрите один конец пенополистирола листом бумаги. Потрите другой конец стержня о жесткую акриловую пластину. Затем брусок вешается на шелковую нить, проходящую через его центр. Он будет аналогичен электрическому маятнику, при этом брусок заменяет бумажный диск на Рис. 2.10. Рис. 5.18 иллюстрирует этот электрический диполь, с одинаковыми по величине, но противоположными по знаку зарядами на его концах.



Рис. 5.18: Поляризованный пенополистирол.

[6][Ferb, Corpo com duas cargas diferentes, p. 11; e Pêndulo de isopor, p. 30].

Отрицательная солома отталкивает отрицательный конец этого стержня и привлекает положительный конец.

Два из этих поляризованных стержней, расположенных бок о бок, поворачивают друг друга. Один стержень оказывает не только крутящий момент на другой, но и суммарную силу. В равновесии, концы, обращенные друг к другу, будут иметь противоположные полярности.

Сделайте электрический диполь, используя пластиковый версориум. Выберите два подходящих материала, чтобы потереть его ножки. Эти материалы должны располагаться на противоположных концах трибоэлектрического ряда относительно пластического материала версориума. То есть один материал должен быть расположен между пластиком и положительным зарядом, в то время как другой материал должен быть расположен между пластиком и отрицательным зарядом. Электризуйте одну ногу отрицательно, а другую положительно. Электрический диполь формируется, когда обе ноги наэлектризованы одинаковыми по величине, но противоположными по знаку зарядами, Рис. 5.19.

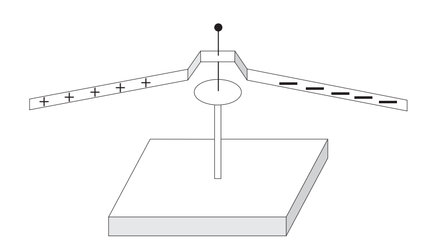


Рис. 5.19: Поляризованный пластиковый версориум.

Отрицательная нога отталкивается отрицательной соломой и притягивается положительной соломой. Положительная нога отталкивается положительной соломой и притягивается отрицательной соломой.

5.6 Общие аспекты, относящиеся к клейким лентам

Клеящие вещества известны уже тысячи лет. Клейкие ленты были изобретены в 1845 году хирургом Горацием Дэй. Он создал хирургические ленты, покрыв полоски ткани клеем на основе резины. Коммерческие клейкие ленты были введены в начале XX века. Электрические ленты были созданы в начале 1930-х годов. Они назывались «фрикционными лентами», будучи изготовленными из тканевой ленты, которые были пропитаны клеящим материалом, изготовленным с использованием гуттаперчи. В 1940-х годах тканевая бумага была заменена винильной пластиковой лентой.

При изготовлении большинства клейких лент используется чувствительный к давлению клей, ЧДК. То есть степень сцепления между двумя поверхностями зависит от величины приложенного давления. В настоящее

время большинство лент делают из виниловых, ПВХ или пластиковых полосок с нанесенным на одну сторону резинового клея, а на другую – неклейкого слоя. Этот последний слой предотвращает прилипание клея на гладкой стороне, когда катушка наматывается или разматывается.

Глава 6

Электрофор

6.1 Инструмент

Электрофор имеет большое значение в истории электричества. Он состоит из двух частей: (а) изолирующего электризованного основания и (б) коллектора зарядов. Коллектор зарядов состоит в свою очередь из проводника, соединенного с изолирующей рукояткой, раздел 2.6. Изолирующее основание также называется диэлектрической пластиной или лепешкой. Его можно заряжать трением или любым другим способом. Рис. 6.1 представляет собой положительно заряженную изолирующую пластину вместе с коллектором заряда электрофора.

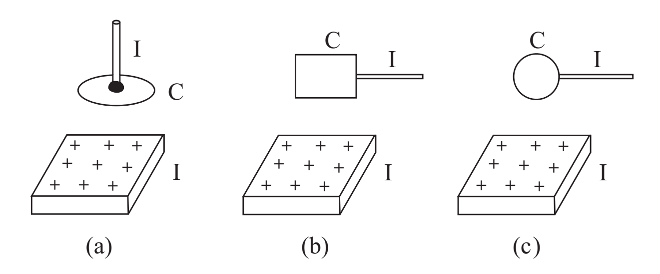


Рис. 6.1: Примеры электрофора, состоящего из изолирующей пластины I, положительно заряженной вместе с ее коллектором заряда, а именно, проводника C с изоляционной рукояткой I.

Обычно изоляционное основание и проводник являются плоскими, хотя этот аспект не является существенным. Они должны иметь одинаковую форму с большой площадью контакта. Изолирующая или диэлектрическая основа должна иметь размер не меньший размера проводника. Это может быть пластиковый лист, пластина из пенополистирола, пластиковая крышка компакт-диска, пластина из ПВХ, акриловая плита и т. д. Ее можно электризовать, быстрыми движениями натирая ее бумажной салфеткой,

шерстью, хлопчатобумажной тканью или другим подходящим материалом.

Некоторые авторы используют название электрофор, когда ссылаются только на часть (б) прибора, а именно, на проводник с изолирующей рукояткой. Эта часть выполняет функцию сбора зарядов.

Сборщик зарядов на Рис. 6.1 (a) может представлять собой, например, металлическую крышку от банки варенья или кусок алюминиевого поддона для пиццы с приделанной ручкой из ПВХ. Этот сборщик зарядов может также представлять собой штампик Кулона, а именно, проводящий диск из тонкого картона, соединенный с пластиковой соломой пластилином.[1] Это также может быть легкая алюминиевая пластина, соединенная с концом горизонтальной пластмассовой вилки с помощью липкой ленты. Сборщик зарядов на Рис. 6.1 (b) может представлять собой, например, типичный электроскоп, подобный использованному нами в этой книге, но без полосы. В этом случае это просто прямоугольный картон, соединенный с пластиковой соломой. Сборщик заряда на Рис. 6.1 (c) может представлять собой, например, шарик из алюминиевой фольги, прикрепленный к концу пластиковой соломы, или металлический шар на конце трубки из ПВХ.

Конкретный электрофор, с помощью которого мы получили хорошую электризацию, представлял собой разовую тарелочку из под пиццы диаметром 30 см с приделанной в ее центре изоляционной рукояткой. Изолирующим основанием для этого электрофора может служить квадратная пластина из ПВХ со сторонами 40 см. Это изоляционное основание электризуется быстрым натиранием бумажной салфеткой или хлопчатобумажной тканью. Клаудио Фурукава из Университета Сан-Паулу дал нам этот электрофон в качестве подарка.[2]

Электрофор был изобретен шведским физиком Йоханом Карлом Вильке (1732-1796). Он опубликовал основные результаты своих исследований в 1762.[3] Первый трибоэлектрический ряд также был получен и опубликован им в 1757 году. Электрофор был усовершенствован и популяризирован Алессандром Вольта около 1775 года. Название «электрофор» ввел Вольта. Оно происходит от греческих слов «янтарь или электрон» и «переносить или содержать», то есть поставщик или носитель электричества.[4] Этот инструмент обычно называют «электрофором Вольта», хотя он был изобретен Вильке.

Немецкий ученый Георг Кристоф Лихтенберг (1742-1799) построил в 1777 году очень большой электрофор. Его коллектор заряда был металлическим диском диаметром 2 м. Эта металлическая пластина поднималась и опускалась с помощью системы блоков, создавая искры длиной до 40 см. Он использовал этот электрофор для производства знаменитых фигур Лихтенберга, а именно, разветвляющихся электрических разрядов на поверхности тел из изолирующего материала.[5]

---

[1] Раздел 2.6.
[2] [MF].
[3] [Hei99, стр. 418-419].
[4] [Hei99, стр. 416-417].
[5] [Lic56], [Har67, стр. 89], [BJ92], [Beu92] и [Ach96, Глава 5].

6.2 Работа электрофора

Эксперимент 6.1 - *Электризация сборщика заряда электрофора*

Этот раздел описывает, как работать с электрофором. На Рис. 6.2 (a) представлена пластина из пенополистирола, поверхность которой отрицательно электризована трением бумажной салфеткой. Сборником заряда этого электрофора может быть диск из тонкого картона с пластиковой соломой в качестве рукоятки или металлический диск с трубкой из ПВХ в качестве ручки. Рис. 6.2 (b) показывает диск на электризованной изолирующей основе. На Рис. 6.2 (c) палец касается верхней стороны металлического диска. Удалите палец, Рис. 6.2 (d). Наконец поднимите сборщик зарядов за ручку, Рис. 6.2 (e), не касаясь его проводящего диска.

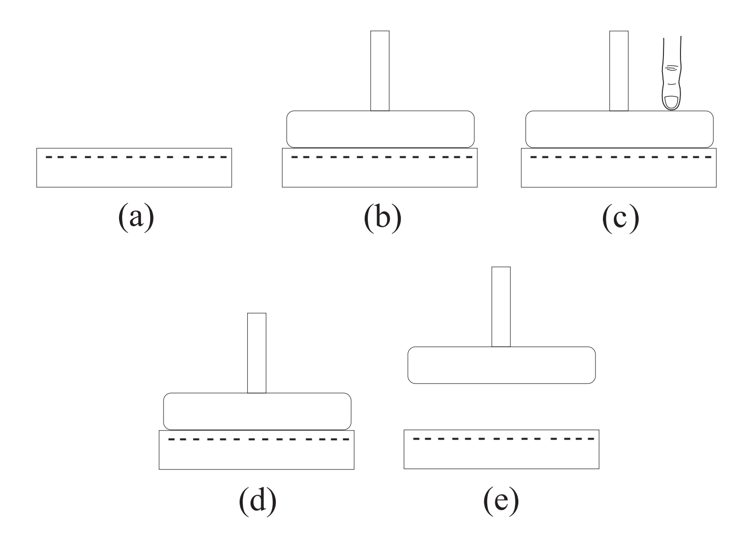


Рис. 6.2: Работа электрофора.

Зарядите два электрических маятника, один положительно, а другой отрицательно. Они должны быть отделены друг от друга. Медленно поднесите сборщик зарядов электрофора к каждому из этих маятников. Обратите внимание, что он отталкивает положительный маятник и притягивает отрицательный маятник. Мы заключаем, что электрофор положительно электризовался в данном случае.

Существует простое объяснение этой электризации на основе электрической индукции или поляризации, Рис. 6.3.

При размещении проводящего диска на электризованной изолирующей пластинке, он поляризуется. При касании пальцем верхней стороны диска, происходит его заземление. Верхняя сторона диска нейтрализуется, но ее нижняя сторона остается электризованной из-за присутствия рядом электризованной изолирующей пластины. Когда палец удаляется, на диске ничего не меняется. Когда диск поднимается рукояткой, происходит перерас-

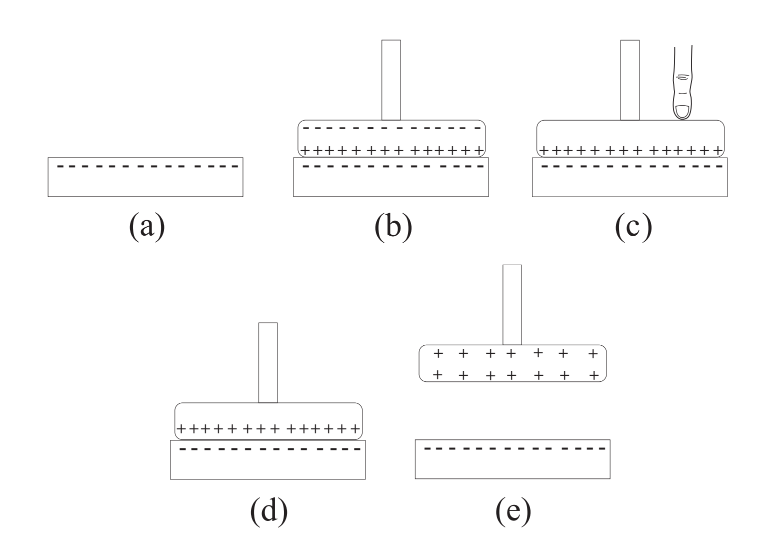


Рис. 6.3: электризация сборщика зарядов суммарным зарядом, знак которого противоположен знаку заряда основания.

пределение суммарного заряда диска между его верхней и нижней сторонами. В конце процесса электрофор электризуется зарядом со знаком, противоположным знаку заряда электризованного основания.

Рис. 6.4 иллюстрирует ситуацию, когда сборщик зарядов состоит из металлической сферы с изоляционной рукояткой. Он касается положительно наэлектризованной изолирующей пластины, которая заряжается отрицательно в конце процесса.

Эксперимент 6.1 показывает, что сборщик зарядов электризуется зарядом, противоположным заряду основания. Электричество, хранящееся в сборщике зарядов, можно легко перенести в любое место; при этом коллектор следует держать только за изолирующую ручку. Тогда заряд можно частично перенести на другой проводник, который изолирован от земли, простым касанием этого проводника коллектором зарядов. Если проводник намного больше, чем коллектор заряда, большая часть заряда коллектора перейдем к нему.

Очень легко электризовать электрофор и манипулировать его зарядом. *Но главное его преимущество состоит в том, что весь этот процесс электризации можно повторять много раз, не вызывая при этом заметной потери заряда на основании.* Предположим, что в каждом цикле мы переносим весь собранный заряд на другой проводник. После многих циклов мы переносим сумму заряда, значительно превышающую по величине количество заряда на электризованной основе. Этот замечательный факт имеет простое объяснение. В каждом цикле сборщик зарядов касается электризованной базы только в нескольких точках. Только эти точки будут нейтрализованы. Другие области электризованной базы в этом процессе не нейтра-

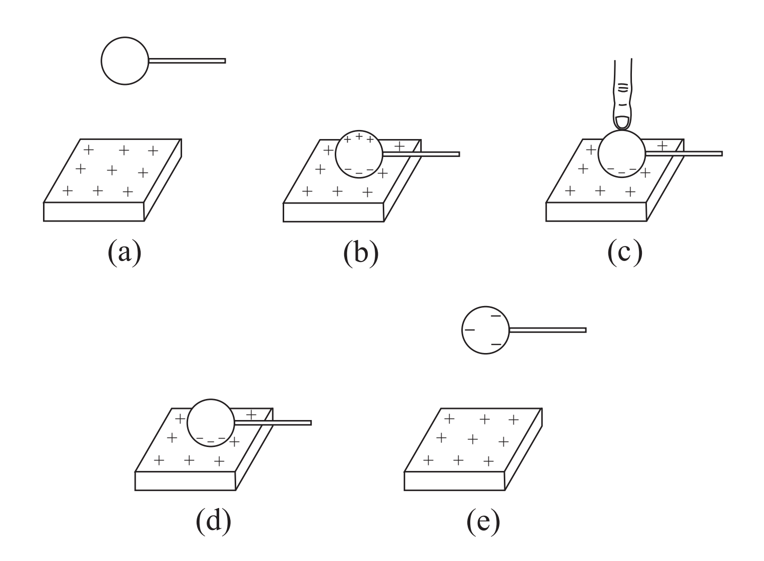


Рис. 6.4: Сферический проводник касается положительной изолирующей пластины.

лизуются. В конце концов, это – изолятор, который не допускает движения его электризованных частиц. Кроме того, заряды, полученные коллектором в каждом цикле, не снабжаются электризованной плитой. Они поставляются Землей во время заземления пальцем. Важность электризованного основания состоит в том, чтобы поляризовать проводник сборщика зарядов. Сборщик зарядов получает избыточный заряд через заземление. Поскольку площадь поверхности проводящей Земли несравнимо больше площади коллектора зарядов, Земля имеет почти неисчерпаемое количество свободных зарядов, которые могут быть переданы коллектору зарядов в повторных циклах.

В конечном итоге электризованная база медленно разряжается. Одна из причин разрядки состоит в том, что небольшое количество электризованных частиц обменивается с коллектором зарядов в точках контакта. Другая причина – небольшая проводимость воздуха из-за присутствия подвижных ионов. Кроме того, база теряет часть своих электризованных частиц через контакт с землей. База, конечно. является изолятором, но в природе нет совершенных изоляторов. Пенополистирол, пластик, акрил и другие изоляционные материалы всегда имеют небольшую проводимость. Но обычно эти потери очень малы и их трудно обнаружить в сухую погоду. Обычно с электрофором можно работать в течение нескольких минут с многократным повтором циклов, не замечая потери заряда его основания. Более того, даже когда количество заряда основания уменьшается во времени или с повтором циклов, вы можете просто потереть еще раз базу, чтобы восстановить ее первоначальную электризацию. Затем вы можете провести еще целую серию циклов зарядки.

Коллектор зарядов электрофора может быть электризован много раз, не разряжая сколь-нибудь заметно его основание. По этой причине Вольта назвал это устройство *elettroforo perpetuo*, то есть неисчерпаемым поставщиком заряда. Его диэлектрический блин сохранял заряд почти неизменно в течение многих рабочих циклов:[6]

> [...] раз электризованный, быстро и не очень сильно, никогда не теряет свое электричество и, хотя его неоднократно трогали, упрямо сохранял силу своих зарядов.

Эксперимент 6.2 - *Зарядка электроскопа в контакте с электризованной базой*

В этом эксперименте прямоугольное электризованное изолирующее основание электрофора остается неподвижным относительно земли в вертикальной плоскости, Рис. 6.5 (a).

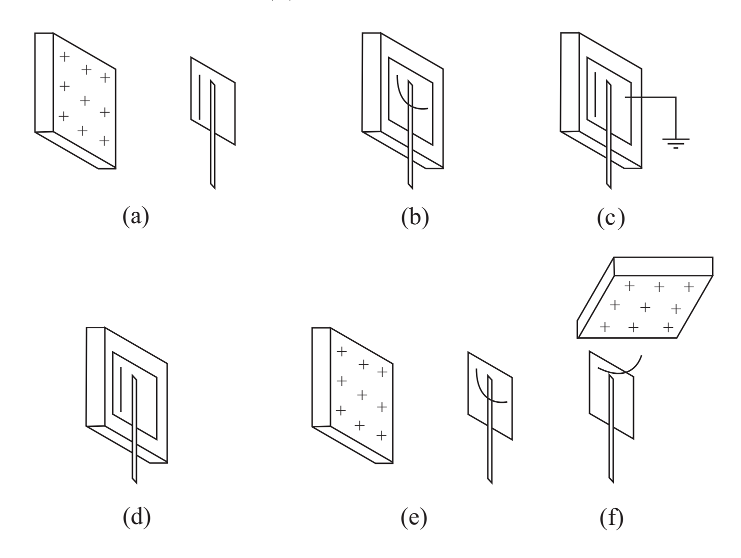


Рис. 6.5: (a) Электризованное основание и сборщик зарядов электрофора, имеющего полоску из папиросной бумаги. (b) Полоска поднимается, когда картон касается электризованной пластины. (c) Полоска падает во время заземления. (d) Она остается в висячем положении, когда заземление отсутствует. (e) Она поднимается, когда сборщик отходит от базы. (f) Полоска, притягиваемая электризованной пластиной.

Сборщик зарядов будет представлять собой прямоугольный тонкий картон с боковыми сторонами 7 на 10 см, соединенный с пластиковой соломой. На внешней стороне этого сборщика зарядов наклеивается одна тонкая полоска из папиросной бумаги, то есть на той же стороне, на которой расположена солома. Держите сборщик зарядов за солому и поместите картон

[6] [Hei99, стр. 416].

на электризованную пластину, касаясь ее. Полоска удаляется от картона, Рис. 6.3 (b). Заземлите картон, когда он касается электризованной базы. Этот процесс заземления может быть выполнен, например, путем касания картона пальцем. Полоска падает, прилипая к прямоугольнику, Рис. 6.3 (c). Полоска остается внизу, когда заземление устранено, Рис. 6.3 (d). Удалите электрофор от электризованной пластины, удерживая его за изолирующую ручку. Полоса снова поднимается, Рис. 6.3 (e). Поместите положительно электризованную изолирующую плиту с горизонтальной ориентацией. Поднесите ее вплотную к картону, ее полоса движется к пластине, Нис. 6.3 (f). Этот факт указывает на то, что коллектор электризовался зарядом со знаком, противоположным заряду электризованной пластины.

Такое поведение можно объяснить распределением заряда на Рис. 6.3, изменяя знаки всех зарядов.

Эксперимент 6.3 - *Электрическая змея*

Выполните эксперимент с электрической змеей.[7] Сборником заряда электрофора будет диск на Рис. 6.1 (a). Поместите на диск кусочки бумаги (или небольшие кусочки алюминиевой фольги или кусочки папиросной бумаги) на той же стороне, на которой была установлена изоляционная рукоятка. Сборщик зарядов электризуется, как в эксперименте 6.1. Когда сборщик зарядов отходит от электризованной базы, некоторые куски бумаги отскакивают от диска. Теперь поднесите палец близко к верхней стороне диска. Остальные кусочки бумаги притягиваются пальцем, касаются его и падают обратно на диск.

Эксперимент не будет работать должным образом, если бумажные куски заменить небольшими кусками изоляционного материала, как пластиковый пакет.

Этот эксперимент связан с янтарным эффектом и демонстрирует обратное явление. В янтарном эффекте потертая солома приближается к мелким кусочкам бумаги, и они прыгают на потертый пластик. Хотя куски бумаги первоначально нейтральны, они поляризуются действием рядом расположенной электризованной соломы. Когда бумажные куски лежат на проводящей поверхности, они приобретают суммарный заряд со знаком противоположным знаку заряда на соломе.[8]

В настоящем эксперименте, с другой стороны, диск электрофора и кусочки бумаги, которые расположены на диске, электризуются зарядами того же знака, когда мы удаляем сборщик зарядов от электризованной базы. Из-за отталкивания электризованных кусков бумаги электризованным диском, некоторые из этих кусков отскакивают от диска, когда диск отходит от базы. Когда палец прижимается к диску, остальные куски притягиваются к нему. Палец – заземленный проводник. Палец, когда он находится далеко от электризованного диска, нейтрален. Когда он приближается к электризованному диску, кончик пальца электризуется зарядом противоположного

[7] [FR08, стр. 86].

[8] Как обсуждалось в подразделе 4.1.2. См. также раздел 8.3 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

знака. Теперь электризованный палец притягивает противоположно заряженные бумажные куски. Поскольку оставшиеся куски также отталкиваются электризованным диском, они перемещаются к пальцу. Когда маленькие кусочки бумаги касаются пальца, они получают суммарный заряд того же знака, что и кончик пальца по механизму ПКО. Теперь они отталкиваются пальцем и притягиваются диском, падая обратно на диск.

Этот эксперимент и янтарный эффект иллюстрируют принцип действия и противодействия. В янтарном эффекте электризованная солома привлекает бумажные кусочки, которые были первоначально нейтральными. Здесь, с другой стороны, электризованные куски бумаги притягиваются пальцем, который был первоначально нейтральным.

6.3 Личный опыт

Я привожу здесь конкретный опыт, который может быть полезен другим людям. Во время моей дипломной работы по физике в Университете Кампинаса UNICAMP (1980-1983), я прочитал об электрофоре и решил построить этот инструмент. В качестве сборщика заряда я использовал круглую крышку металлической банки. Я отпилил кусок длиной в 20 см от деревянной ручки метлы и использовал его в качестве изолирующего держателя. Я прибил гвоздем держатель на диск. Я пробовал несколько изоляционных оснований, таких как пластиковый пакет, акриловая плита или пластина из ПВХ. Чтобы электризовать эту базу, я потер ее бумажной салфеткой, хлопчатобумажной тканью и другими материалами.

Я попробовал провести несколько простых экспериментов, как описано в учебниках, но всегда терпел неудачу. То есть я не мог воспроизвести с моим электрофором электрические явления, описанные в учебниках. Первоначально я предполагал, что база не получила достаточно большого количества заряда. Я изменил материал опорной плиты, но ничего не изменилось. Я пробовал различные материалы для потирания тарелки – снова неудача. Пробовал я также различные методы зарядки трением. Ничего не работало. В конце концов я отказался от этого и других экспериментов, связанных с электричеством. Я пришел к выводу, что виной тому было отсутствие у меня способностей к экспериментальной физике. Этот неудачный опыт явился одной из причин, почему я решил посвятить себя теоретической физике.

В начале 1990-х я обнаружил работы Норберто Феррейры.[9] Они помогли мне найти правильное объяснение моего провала. Это не было недостатком практических способностей. Моя ошибка заключалась в том, что я использовал деревянную ручку в качестве изоляционного материала. В то время я считал, что эта ручка была изолятором просто из-за того, что она была сделана из дерева. В конце концов, именно такое представление невольно складывается в голове после чтения большинства школьных учебников. Они учат, что древесина, стекло, резина, вода и многие другие вещества

[9] [Fer78], [FM91], [Fera], [Ferb], [Ferc] , [Ferd], [Fer06], [Fer01c], [Fer01d], [Fer01b] и [Fer01a].

являются изоляторами и приводят даже их диэлектрические постоянные. С другой стороны, металлы и человеческий организм считаются проводниками. Во время учебы в университете я никогда не думал, что кусок дерева может вести себя как проводник. Поэтому я никогда не пытался проверить его проводящие свойства, и мне не пришло в голову заменить его трубой из ПВХ или другим материалом.

В работах Норберто Феррейры я обнаружил, что большинство материалов ведут себя как проводники в электростатических экспериментов. Проводящие материалы включают многие виды древесины, стекла и резины, воду из под крана и т. д. Этот момент был самым важным уроком, который я усвоил из его работ. То есть, вместо того чтобы заявлять, что определенное тело *является* проводником или изолятором, правильнее сказать, что этот материал *ведет себя как* проводник или изолятор, *в зависимости от внутренних и внешних условий*. В частности, когда мы прикладываем высокое напряжение между концами тела, конкретный материал, который обычно ведет себя как изолятор при низких напряжениях, может вести себя как проводник. Поскольку в электростатике мы обычно имеем дело с высоким напряжением, в пределах от 1000 В до 10 000 В, большинство материалов ведут себя как проводники.

Возможно, деревянная ручка, которую я использовал для коллектора зарядов в моем электрофоре, вела себя как проводник. По этой причине я не мог накопить никаких зарядов с моим инструментом, и эксперименты не удались. Заменив деревянную ручку трубкой из ПВХ или другой изолирующей ручкой, простые эксперименты, описанные в учебниках, можно легко повторить.

Моя первоначальная неудача и разочарование иллюстрируют, как важно всегда тестировать проводящее поведение материалов перед началом любого эксперимента. Чтобы узнать, ведет ли вещество себя как проводник или как изолятор, лучше всего использовать электроскоп, описанный в разделе 3.1. Норберто Феррейра также научил меня строить простые и дешевые электроскопы и многие другие устройства, которые отлично работают. Это был второй важный урок, который я усвоил из его работ.

Глава 7

Распределение зарядов в проводнике

В этой книге представлены несколько экспериментов с полыми проводниками. Обычно это будет цилиндрическая оболочка из бумаги, картона или металла (например, чашка или банка). Иногда эту цилиндрическую оболочку мы будем называть цилиндром. У него не будет крышек наверху и/или внизу, чтобы можно было видеть, что происходит внутри него. Вы также можете использовать цилиндрическую металлическую сетку. При необходимости цилиндр можно изолировать от земли, поддерживая его на вертикальных соломках, закрепленных липкой лентой. Цилиндрическая оболочка также изолирована, когда она покоится на пластине из пенополистирола или на акриловой крышке. Чем толще плита, тем лучше будет ее изоляция. Хорошая изоляция для этих экспериментов может быть достигнута с помощью пластин толщиной от 2 до 5 см.

7.1 Распределение зарядов в проводниках

7.1.1 Эксперименты с электроскопами

Эксперимент 7.1 - *Электризация цилиндрической оболочки*

Подготовьте цилиндрическую оболочку Рис. 7.1 (a). Эта оболочка будет использоваться в качестве изогнутого электроскопа. Внутренние и внешние полосы папиросной бумаги укажут поверхностные плотности заряда на внутренней и внешней стенках.

Вырежьте прямоугольник из бумаги или тонкого картона со сторонами 10 на 20 см (или 10 на 30 см). Пластиковая соломка фиксируется липкой лентой таким образом, что часть ее остается вне полосы. Замкните прямоугольник, образуя цилиндрическую оболочку. Соприкасающиеся края бумаги можно склеить или скрепить с помощью степлера. Эту цилиндрическую оболочку будем иногда называть просто цилиндром. Отрежьте очень

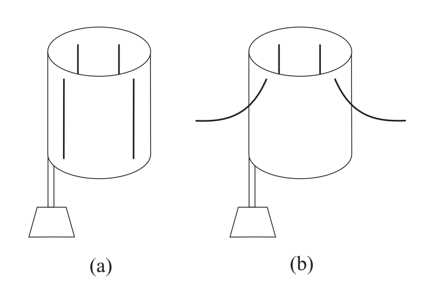


Рис. 7.1: (a) Цилиндрическая оболочка изготовлена из бумаги и изолирована от земли. (b) Электризованная цилиндрическая оболочка с поднятыми наружными полосами. Чем больше электризация цилиндра, тем выше поднимаются его полоски.

маленькие полоски папиросной бумаги, шириной от 1 до 3 мм и длиной от 5 до 9 см. Их верхние концы должны быть склеены внутри и снаружи цилиндра. Вертикальная соломка затем фиксируется на соответствующей опоре, например, на опоре, сделанной из тонкой пластиковой кофейной чашки, гипса и скрепки, Рис. 7.1 (a).

Электризуйте пластиковую соломку или акриловую линейку, потерев ее волосами или бумажной салфеткой. Поскребите натертой соломкой несколько раз по верхнему краю цилиндра, пока он не станет электризованной, о чем свидетельствуют его приподнятые полоски. Цилиндр можно также наэлектризовать с помощью изображенного на Рис. 6.1 (b) электрофора. Чтобы наэлектризовать бумажную оболочку, прикоснитесь к верхнему краю цилиндра электризованным электрофором. Этот процесс следует повторить несколько раз, каждый раз электризуя электрофор, прежде чем коснуться цилиндра. Когда цилиндр приобретет достаточно большое количество электричества, обратите внимание, что только его внешние полосы остаются поднятыми. Его внутренние полосы, с другой стороны, остаются в висячем положении и не отходят от цилиндра даже когда он наэлектризован, как показано на Рис. 7.1 (b).

Обратите внимание, что внешние полосы поднимаются все выше. То есть угол их отклонения увеличивается каждый раз, когда мы царапаем наэлектризованной соломкой по цилиндру, или когда наэлектризованный электрофор касается его верхнего края. Они продолжают подниматься, пока не достигнут определенного предельного уровня. После достижения этого максимального отклонения, вы можете поскрести цилиндр наэлектризованной соломкой, или прикоснуться к нему наэлектризованным электрофором, но полосы не поднимутся выше.

Эксперимент 7.2 - *Электризация бумажного прямоугольника*

Вырежьте прямоугольник из бумаги или тонкого картона со сторонами 7 на 20 см (или 10 на 30 см). Закрепите две или три соломки клейкими лентами таким образом, чтобы часть каждой соломки оставалась вне по-

лосы. Полоса должна оставаться вертикальной, а соломки должны быть закреплены на соответствующих опорах. Отрежьте две тонкие полоски папиросной бумаги длиной 6 см и шириной от 1 до 3 мм. Верхний конец одной полосы должен быть приклеен в центре одной стороны бумаги, а верхний конец другой полосы должен быть приклеен в центре другой стороны бумаги, как показано на Рис. 7.2. Этот инструмент будет похож на широкий электроскоп с полоской папиросной бумаги с каждой стороны. Он изолирован от земли пластиковыми соломками.

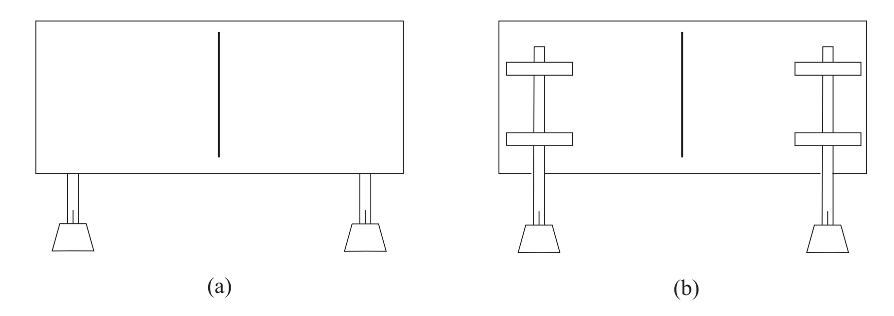


Рис. 7.2: (a) Бумажный прямоугольник, вид спереди. (b) Вид сзади.

Проведите наэлектризованной соломкой по верхней краю прямоугольника. Полосы с обеих сторон поднимаются, Рис. 7.3. Прямоугольник также можно электризовать, касаясь его верхней границы коллектором заряда электризованного электрофора.

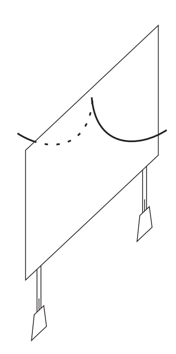


Рис. 7.3: Электризованный прямоугольник.

Этот процесс зарядки можно повторить несколько раз. Чем больше наэлектризован прямоугольник, тем выше угол отклонения его полос.

Эксперимент 7.3 - *Изгиб электризованного прямоугольника*

Назовем A одну сторону прямоугольника и B другую сторону. Держите электроскоп эксперимента 7.2 за пластмассовые соломки или за их подставки, не касаясь прямоугольной бумаги. Тогда он деформируется в цилиндри-

ческую оболочку.[1] При замыкании круга, внутренняя полоса на стороне B опускается, а внешняя полоса на стороне A поднимается, Рис. 7.4 (a). Когда мы замкнули круг, внутренняя полоса падает. Кроме того, внешняя полоса выше в этой конфигурации Рис. 7.4 (a), чем полоски с обеих сторон Рис. 7.3.

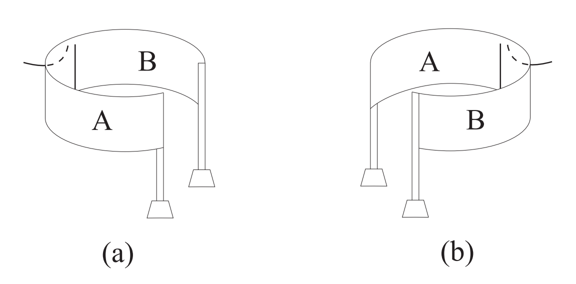


Рис. 7.4: Электризованная кольцевая полоса. (a) и (b): Внутренние полосы падают, а внешние — поднимаются.

Разомкните кольцевую полосу, возвращаясь к прямоугольнику. Сделайте другую цилиндрическую оболочку, согнув прямоугольник в другую сторону. Полоска папиросной бумаги на стороне B, которая была внизу на Рис. 7.4 (a), теперь приподнята и расположена на внешней стороне нового кольца, Рис. 7.4 (b). Полоска папиросной бумаги на стороне A, которая была приподнята на Рис. 7.4 (a), теперь опущена и расположена на внутренней стороне нового кольца, Рис. 7.4 (b).

Эксперимент 7.4 - *Разделение двух частей электризованного проводника*

В аналогичном эксперименте используется инструмент, состоящий из двух независимых частей, которые можно отделить друг от друга.[2] Первая часть этого инструмента – простой электроскоп из прямоугольного картона, соединенного с двумя пластиковыми соломками, закрепленными на двух подходящих опорах. На этом электроскопе наклеены две тонкие полоски тонкой бумаги, по одной с каждой стороны, как на Рис. 7.2. Вторая часть этого инструмента представляет собой цилиндрическую полоску из бумаги или тонкого картона. соломки и картон обеих частей должны иметь одинаковую высоту. Эта цилиндрическая полоса также соединена с двумя соломками, закрепленными на соответствующих опорах. Первоначально границы обеих частей касаются друг друга. Полоски папиросной бумаги на обеих сторонах электроскопа должны быть опущены.

Электризуйте систему, проводя по верхнему краю электроскопа потертой соломкой. Систему также можно зарядить, прикоснувшись к картону электризованным электрофором. Наружная полоса папиросной бумаги при

[1] [FM91, стр. 74-75], [Ferb, Gaiola de Faraday, p. 45] и [FR08, стр. 89-90].
[2] [Fer78, Раздел 4.10.9, с. 89-90].

этом идет вверх, а внутренняя полоса папиросной бумаги остается внизу, Рис. 7.5 (a).

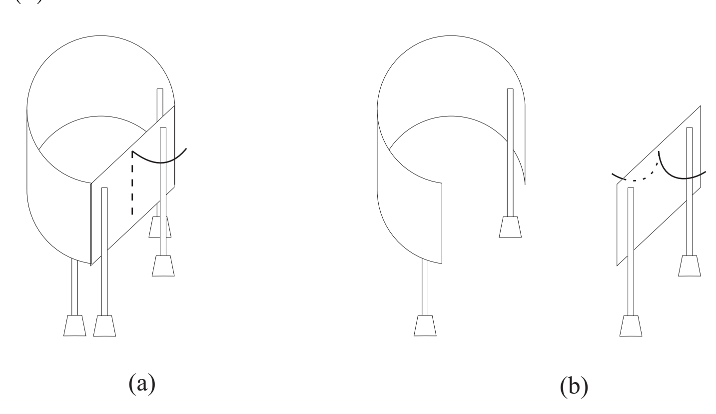


Рис. 7.5: (a) Электризованная система с двумя картонами, соприкасающимися друг с другом. Только наружная полоса папиросной бумаги идет вверх. (b) Когда обе части разделены, внешняя полоса немного опускается, а внутренняя полоса поднимается вверх.

Отделите обе части этого инструмента, удерживая только опоры или соломки, не касаясь картона. Внешняя полоса идет немного вниз, а внутренняя полоса на Рис. 7.5 (a) идет вверх, как показано на Рис. 7.5 (b).

7.1.2 Сбор зарядов, расположенных на внутренней и внешней стенках электризованного проводника

В предыдущих экспериментах анализировалось только поведение тонких полосок тонкой бумаги. Следующие эксперименты показывают, как собирать непосредственно часть наэлектризованных частиц, распределенных по внутренней и внешней стенкам наэлектризованной цилиндрической оболочки.

Эксперимент 7.5 - *Попытка собрать заряды на внутренней стенке электризованной цилиндрической оболочки*

Теперь используйте цилиндрическую оболочку эксперимента 7.1 без внутренних полос и с одной внешней полосой папиросной бумаги. Этот цилиндр изолирован от земли пластиковой соломкой. Поскребите отрицательно заряженной соломкой по ее верхнему краю, пока полоска папиросной бумаги не поднимется вверх, Рис. 7.6 (a). Оболочка заряжается отрицательно.

Коллектор заряда будет представлять собой шарик из алюминиевой фольги, соединенный с концом пластиковой соломки, Рис. 2.15 (b). Этот коллектор должен быть первоначально разряжен, Рис. 7.6 (a).

Удерживая коллектор за соломку, прикоснитесь шариком из алюминиевой фольги к *внутренней* стенке электризованного цилиндра, Рис. 7.6 (b).

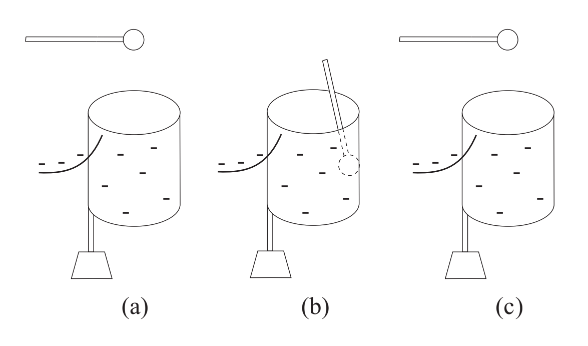


Рис. 7.6: (a) Разряженный коллектор и отрицательно электризованная цилиндрическая оболочка. (b) Прикоснитесь шариком из алюминиевой фольги к внутренней стенке цилиндрической оболочки. (c) Удалив коллектор заряда, убедитесь, что он остается разряженным.

Удалите коллектор и проверьте его электризацию. Для этого поднесите его к разряженному электрическому маятнику или металлическому версориуму. Обратите внимание, что электрический маятник и металлический версориум не двигаются. Мы заключаем, что коллектор не получил суммарного заряда при прикосновении к внутренней стенке электризованного цилиндра. 7.6 (c).

Эксперимент 7.6 - *Сбор зарядов на внешней стенке электризованной цилиндрической оболочки*

Повторите эксперимент 7.5, начиная снова с разряженного коллектора и отрицательно наэлектризованной цилиндрической оболочки, Рис. 7.7 (a).

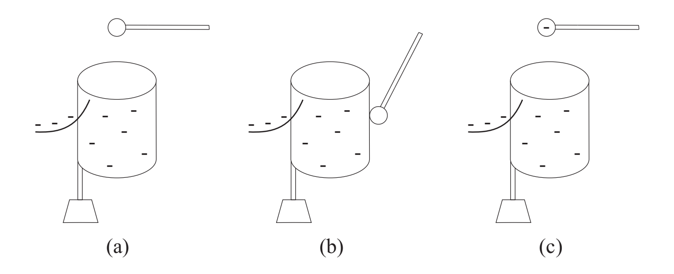


Рис. 7.7: (a) Разряженный коллектор и отрицательно электризованная цилиндрическая оболочка. (b) Коснитесь шариком из алюминиевой фольги внешнюю стенку цилиндрической оболочки. (c) Удалите коллектор заряда и проверьте его заряд, подтверждая, что он отрицательно электризован.

Коснитесь шариком из алюминиевой фольги *наружнюю* стенку электризованного цилиндра, Рис. 7.7 (b). Проверьте его заряд, приближая его к нейтральному маятнику или металлическому версориуму. Маятник и версориум притягиваются шаром, показывая, что он теперь наэлектризован.

Поднесите наэлектризованный шар близко к двум наэлектризованным маятникам – один положительно, а другой отрицательно. Шар притягивает положительный маятник и отталкивает отрицательный, показывая, что коллектор зарядов стал отрицательно электризованным, Рис. 7.7 (c).

Эксперимент 7.7 - *Попытка собрать заряды на внутренней стенке электризованной цилиндрической оболочки с помощью небольшого электроскопа*

Эксперимент 7.5 также можно выполнить с другим коллектором заряда, а именно, с квадратным картоном, соединенным с соломой. Квадрат может быть небольшого размера, скажем стороной в 5 см. Верхний конец тонкой полоски папиросной бумаги можно приклеить на этот картон; она будет указывать, когда картон заряжен. Этот коллектор будет использоваться как обычный электроскоп, но теперь верхний конец полоски папиросной бумаги приклеен на противоположной стороне картона, как показано на Рис. 7.8 (a). Соскоблите картон электроскопа потертой соломкой или дотроньтесь до него заряженным электрофором. Этот коллектор наэлектризован, как показывает его поднятая полоса, Рис. 7.8 (b).

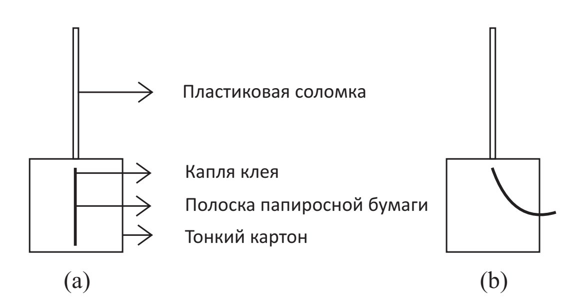


Рис. 7.8: (a) Разряженный сборщик зарядов. (b) Электризованный коллектор.

Первоначально коллектор должен быть разряжен с полоской папиросной бумаги в вертикальном положении. Снова начните эксперимент с отрицательно заряженной цилиндрической оболочкой, Рис. 7.9 (a).

Удерживая коллектор за соломку, дотроньтесь до края картона на внутренней стенке электризованной цилиндрической оболочки, Рис. 7.9 (b). Когда коллектор заряда выносится из оболочки, его полоска сохраняет вертикально висящее положение, Рис. 7.9 (c). Этот факт указывает на то, что коллектор заряда остается разряженным.

Эксперимент 7.8 - *Сбор зарядов на внешней стенке электризованной цилиндрической оболочки с помощью небольшого электроскопа*

Начните эксперимент 7.7 еще раз с разряженным коллектором и отрицательно наэлектризованной цилиндрической оболочкой, Рис. 7.10 (a).

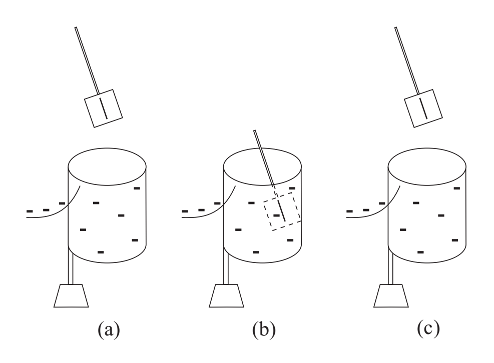


Рис. 7.9: (a) Разряженный коллектор и отрицательно электризованная цилиндрическая оболочка. (b) Прикоснитесь к краю картона на внутренней стенке электризованной цилиндрической оболочки. (b) Сняв коллектор, убедитесь, что он остается разряженным.

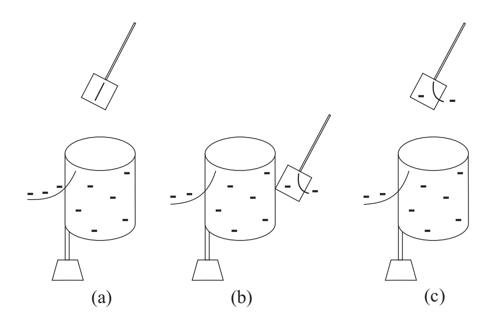


Рис. 7.10: (a) Разряженный коллектор и отрицательно электризованная цилиндрическая оболочка. (b) Прикоснитесь к краю картона на внешней стенке электризованной цилиндрической оболочки. (b) Удалив коллектор заряда, убедитесь, что он теперь отрицательно электризован.

Прикоснитесь к краю картона на внешней стенке электризованной цилиндрической оболочки. Полоска коллектора идет вверх, Рис. 7.10 (b). Обратите внимание, что иногда внешняя полоска заряженного электроскопа немного опускается. При удалении коллектора, его полоса остается поднятой. Вы можете проверить заряд коллектора, приблизив его к положительно заряженному маятнику, а затем к отрицательно заряженному маятнику. Он притягивает положительный маятник и отталкивает отрицательный маятник, показывая, что коллектор отрицательно электризован, Рис. 7.10 (c).

7.1.3 Грей, Франклин и распределение зарядов на электризованных проводниках

Эксперименты подразделов 7.1.1 и 7.1.2 показывают, что в полом электризованном проводнике заряды распространяются только по его *внешней* по-

верхности. Стивен Грей первым пришел к такому выводу в 1731 году на основе другого эксперимента.[3] Он подвесил два дубовых кубика на концах проводящей нити (его линия связи). Они были одинакового размера, но один из них был полым, а другой – сплошным. Струна была изолирована от земли и подвешена на шелковых веревках. Тонкие латунные листья были помещены под кубиками. Он поднес электризованную стеклянную трубку близко к центру проводящей струны и заметил, что оба кубика привлекали одинаковое количество листьев на одинаковой высоте, как показано на Рис. 7.11.

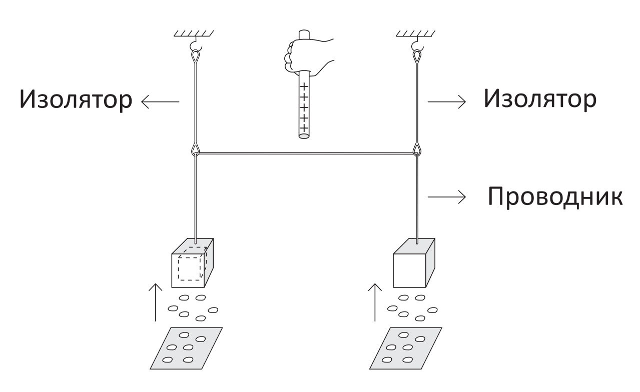


Рис. 7.11: Два дубовых кубика, один полый, а другой сплошной, притягивают листья латуни с одинаковой интенсивностью.

Ниже мы приводим описание эксперимента Грея его же словами(курсив и слова в квадратных скобках наши):[4]

> *Некоторое время спустя, у мистера Уиллера, мы провели следующий эксперимент, чтобы проверить, пропорционально ли электрическое притяжение количеству вещества в телах.*
>
> Было сделано два кубика из дуба, со стороной около шести квадратных дюймов [15 см^2] – один сплошной, а другой полый. Они были подвешены двумя волокнами волос почти так же, как в упомянутом выше эксперименте; кубики отстояли друг от друга, по нашим оценкам, на расстоянии около четырнадцати или пятнадцати футов [4,6 м]; линия связи была привязана к каждому волосу, а листочки латуни были размещены под кубиками, [стеклянная] трубка была натерта и удерживалась над серединой линии [коммуникации] на равных расстояниях от кубов, когда оба они притягивали и отталкивали листочек латуни в одно и то же время и на одинаковую высоту; *так что казалось, что в сплошном теле не было большего притяжения, чем в полом кубе; все же я склонен думать, что электрическая эфлувия проходит через все внутренние части твердого куба, хотя никакая часть, кроме поверхности, не притягивает*; поскольку, судя по нескольким экспериментам, похоже, что если произвольное твердое тело касается тела,

[3]Раздел B.8 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11] , [Ass15b] и [Ass17].
[4][Graf, стр. 35], [Bos11, стр. 160-161] и [BAC12, стр. 154-155].

которое притягивает, его притяжение прекращается, пока это твердое тело не будет удалено, а другое снова не будет возбуждено трубкой.

Бенджамин Франклин был первым, кто выполнил в 1755 году эксперимент, аналогичный экспериментам 7.5 и 7.7, хотя он не мог объяснить свои находки (наши слова в квадратных скобках):[5]

> Я наэлектризовал серебряную банку на электрической подставке [то есть на изолирующей подставке], а затем опустил в нее пробку в виде шарика диаметром около дюйма, висящей на шелковой нити, пока пробка не коснулась дна банки. Пробка не была притянута к внутренней стенке банки, как она притянулась бы к внешней стенке, и, хотя она касалась дна, все же, когда она была вытянута, она не была наэлектризована этим прикосновением, как это было бы при касании снаружи. Факт необычный. Вы спросите причину: я не знаю.

В 1775 году Джозеф Пристли (1733-1804) на основе эксперимента Франклина сделал вывод, что электрическое притяжение изменяется обратно квадрату расстояния между взаимодействующими телами по аналогии с гравитационным притяжением:[6]

> Не можем ли мы сделать вывод из этого эксперимента, что притяжение электричества подчиняется тем же законам, что и гравитация, и, следовательно, согласно квадратам расстояний; поскольку легко продемонстрировать, что если бы земля имела форму оболочки, то тело внутри нее не притягивалось бы к одной стороне больше, чем к другой.

Пристли имел здесь в виду две знаменитые теоремы Исаака Ньютона (1642-1727), Рис. 7.12.

Эти теоремы были включены в раздел XII книги I его работы *Математические принципы натуральной философии*:[7]

> *Section 12: Силы притяжения сферических тел.*
>
> *Предложение 70. Теорема 30: Если каждая точка сферической поверхности притягивает с равной центростремительной силой, убывающей как квадрат расстояния от этой точки, я говорю, что корпускула, расположенная внутри этой поверхности, никак не будет притягиваться этими силами.*
>
> [...]
>
> *Предложение 71. Теорема 31: При тех же предположениях, что и выше, я говорю, что корпускула, расположенная вне сферической поверхности, притягивается к центру сферы с силой, обратно пропорциональной квадрату ее расстояния от этого центра.*

---

[5] [Fra69, Letter 24, стр. 326-327] и [Hei99, стр. 464].
[6] [Pri75, стр. 372-374], [Pri66, стр. 372-374], [Whi73a, стр. 53-54] и [Hei99, стр. 464].
[7] [New34, стр. 193], [New90, стр. 221], [Ass13, стр. 9-10] и [Ass14, стр. 10-11].

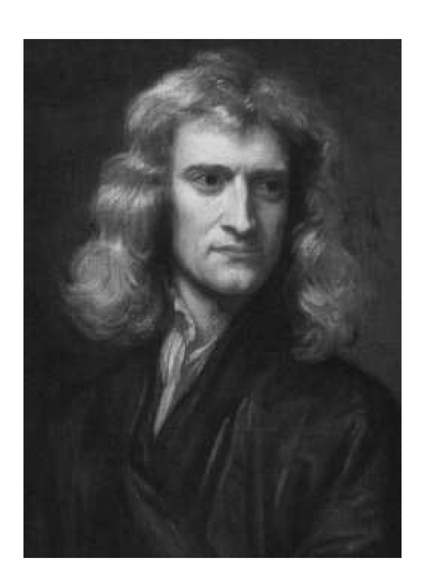


Рис. 7.12: Исаак Ньютон (1642-1727). Это самый известный портрет Ньютона. Он был сделан Годфри Кнеллером (1646-1723) в 1689 году. Ньютон представлен с его естественными волосами, на пике своей научной карьеры, через два года после публикации *Принципов.*

Теоремы Ньютона верны для сферической оболочки. Они не действуют для цилиндрической оболочки с однородной поверхностной плотностью массы. Франклин, с другой стороны, показал, что электризованная банка не оказывает силу на нейтральный шарик из пробки, размещенный где-либо внутри банки. Есть существенная разница между гравитационной и электрической конфигурациями. В проводящей банке электризованные частицы могут свободно двигаться. В равновесии они располагаются таким образом, что все части электризованного тела приобретают один и тот же электростатический потенциал. В этой равновесной конфигурации плотность поверхностного заряда изменяется от точки к точке. Кроме того, в равновесии электризованная проводящая банка не будет поляризовывать нейтральный проводник, размещенный в любом месте внутри банки, кроме как вблизи ее открытой крышки. Поскольку находящийся внутри банки проводник не поляризуется электризованной банкой, он не будет притягиваться к какой-либо стороне банки, даже когда он приближается к этой конкретной стороне.

7.1.4 Электризованные проводники, соприкасающиеся с внутренними и внешними стенками другого проводника

В экспериментах с 7.5 по 7.8 мы начали с наэлектризованной цилиндрической оболочки и разряженного коллектора. Повторите эту процедуру в обратном порядке. Начните с наэлектризованного коллектора, который будет касаться первоначально нейтральной цилиндрической оболочки.

Эксперимент 7.9 - *Электризация цилиндрической оболочки путем прикосновения к ее внутренней стенке электризованным коллектором заряда*

Используйте цилиндрическую оболочку эксперимента 7.1 без внутренних полос и с одной внешней полосой папиросной бумаги. Цилиндр изолирован от земли пластиковой соломкой. Он также будет изолирован, если его поддерживать на плите из пенопласта. Он должен быть первоначально разряжен, т. е. его полоска из папиросной бумаги должна висеть в вертикальном положении. Используйте коллектор заряда, состоящий из проводящей сферической оболочки, соединенной с изолирующей ручкой, как показано на Рис. 2.15 (b). Например, шарик из алюминиевой фольги на конце соломки. Он будет использоваться в качестве сборщика зарядов электрофора, заряжаясь в соответствии с процедурой, показанной на Рис. 6.4. То есть прямоугольная изолирующая пластина первоначально электризуется трением о бумажную салфетку или хлопчатобумажную ткань. Удерживая коллектор заряда за ручку, дотроньтесь до нижней части алюминиевого шарика на наэлектризованной пластине, положите палец на верхнюю часть шарика, уберите палец и, наконец, удалите шарик, подняв соломку. Сборщик заряда становится электризованным в результате этой процедуры. В этом можно убедиться, поднося его близко к разряженному электрическому маятнику и наблюдая притяжение диска маятника.

Держите электризованный коллектор за соломку. Коснитесь наэлектризованным алюминиевым шариком внутреннюю стенку цилиндрической оболочки. Повторите эту процедуру несколько раз, всегда электризуя коллектор электрофора перед каждым контактом. Обратите внимание, что наружная полоска папиросной бумаги цилиндрической оболочки постепенно поднимается при каждом прикосновении к наэлектризованному шару. Анализируя заряд цилиндра, сделайте вывод, что он наэлектризован зарядом того же знака, что и шар. Этот факт можно визуализировать, когда шарик коллектора заряда снова электризуется и приближается к внешней поднятой полосе. Они отталкиваются.

Электризуйте еще раз шарик коллектора заряда. Коснитесь им снова внутреннюю стенку электризованного цилиндра. Удалите шарик и проверьте его заряд, когда он приближается к разряженному электрическому маятнику. Обратите внимание, что между ними нет притяжения, что указывает на то, что шар был *полностью разряжен*, когда внутренняя стенка цилиндра коснулась шара. Независимо от того, полностью ли разряжен цилиндр

или же он имеет начальный заряд, наэлектризованный шар полностью разряжается, когда он касается внутренней стенки цилиндрической оболочки, Рис. 7.13.

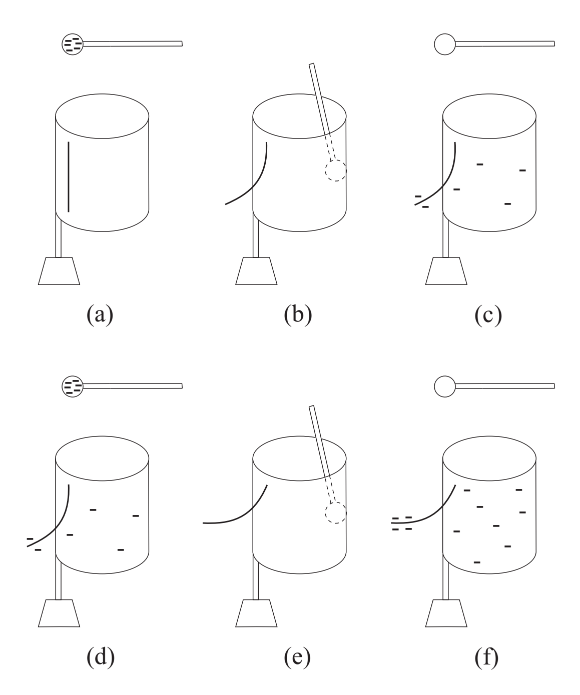


Рис. 7.13: (a) Цилиндр с разряженным и электризованным коллектором. (b) Коснитесь заряженным коллектором внутреннюю стенку цилиндра. Эту процедуру можно повторить много раз. (c) - (f): коллектор полностью разряжается после каждого контакта, в то время как цилиндр становится все более и более электризованным.

Эксперимент 7.10 - *Поднесение нейтрального или наэлектризованного шарика близко к внешней полосе цилиндрической оболочки*

Обратите внимание на другие факты в эксперименте 7.9. Предположим, цилиндрическая оболочка разряжена. Электризуйте сборщик заряда электрофора. Поднесите наэлектризованный шарик коллектора близко к внешней полоске цилиндрической оболочки, не позволяя им вступить в контакт. Обратите внимание, что полоска папиросной бумаги притягивается электризованным шариком. Это притяжение связано с поляризацией цилиндрической оболочки, вызванной наличием находящегося рядом электризованного шара.

Повторите эксперимент 7.9 с электризацией цилиндрической оболочки. Для этого прикоснитесь наэлектризованным шариком к внутренней стенке оболочки, повторяя эту процедуру много раз, пока на оболочке не будет

достаточно большого количества электризации, о чем свидетельствует ее приподнятая полоска.

Снова электризуйте шарик коллектора заряда электрофора и поднесите его близко к поднятой полоске. Наблюдайте в этом случае отталкивание полосы. Это отталкивание указывает на то, что шар и полоска наэлектризованы зарядами одного знака.

Еще раз коснитесь наэлектризованным шаром внутреннюю стенку наэлектризованного цилиндра. Эта процедура полностью разряжает шарик, как показано в эксперименте 7.9. Удалите разряженный шарик и поднесите его близко к поднятой полоске, не давая им соприкоснуться. Наблюдайте еще раз, как полоска притягивает шарик. На этот раз притяжение связано с поляризацией проводящего шара, вызванной электризацией цилиндра и его поднятой полосы. Шар изолирован от земли его соломой.

Эксперимент 7.11 - *Цилиндрическая оболочка с внутренней и внешней полосами*

Эксперимент 7.9 можно также провести, когда цилиндрическая оболочка имеет внутренние и внешние тонкие полоски папиросной бумаги. Начните с разряженной оболочки. В этом случае, когда электризованный шарик из алюминиевой фольги попадает в цилиндрическую оболочку, внутренняя полоса притягивается им. После контакта разъедините их. Обратите внимание, что внутренняя полоса падает после контакта. Когда она снова принимает вертикально висящее положение, она больше не притягивается к шарику, к которому только что прикоснулась. Удалите коллектор заряда. Проверь его электризацию. Сделайте вывод, что он был полностью разряжен, когда внутренняя полоска коснулась шарика.

Повторите эту процедуру несколько раз. Внутренние полосы всегда притягиваются, касаются наэлектризованного шара и снова падают. Внешние полосы, с другой стороны, отходят все больше и больше от внешней поверхности оболочки. Более того, всякий раз, когда мы проверяем электризацию шара после контакта с внутренней полосой, мы видим, что он полностью разряжен.

Эксперимент 7.12 - *Электризация цилиндрической оболочки путем прикосновения к ее внешней стенке электризованным коллектором заряда*

Выполните вариант эксперимента 7.9. На этот раз наэлектризованный шарик из алюминиевой фольги касается только внешней стенки цилиндрической оболочки. После каждого контакта шарик снова электризуется электрофором. Обратите внимание, что наружная полоса папиросной бумаги поднимается все больше и больше после каждого контакта. Внутренняя полоса, с другой стороны, всегда остается вертикальной, независимо от того, сколько раз наэлектризованный шар касается цилиндра. Проверьте также электризацию шара после каждого контакта с внешней стенкой цилиндра. Обратите внимание, что он всегда остается немного заряженным. В этом можно убедиться, если приблизить этот шарик к другому разряженному

электроскопу. Обратите внимание, что он привлекает полоску электроскопа. Это видно, когда этот шарик приближается к внешней полосе электризованного цилиндра, к которому он только что прикоснулся. Обратите внимание, что эта приподнятая полоса отталкивается от шара, указывая на то, что она не была полностью разряжена, когда коснулась внешней стенки. Цилиндрическая оболочка, с другой стороны, все больше и больше электризуется при каждом соприкосновении с наэлектризованным шариком, Рис. 7.14.

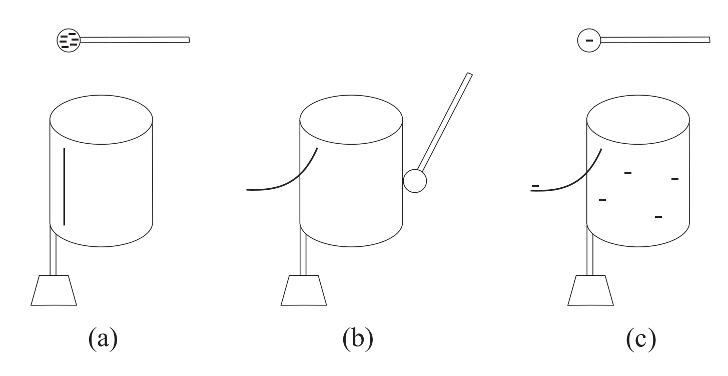


Рис. 7.14: (a) Разряженный цилиндр и электризованный коллектор. (b) Коллектор касается внешней стенки цилиндра. (c) Коллектор теряет часть своего заряда, в то время как цилиндр становится немного электризованным.

Эксперимент 7.13 - *Повторение этих экспериментов с небольшим электроскопом*

Эксперименты 7.9 и 7.12 можно повторить, используя сборщик зарядов из эксперимента 7.7, Рис. 7.8. Этот коллектор должен быть первоначально наэлектризован, как указывает на то его поднятая полоска.

Держите наэлектризованный коллектор заряда за его соломку и дотроньтесь до края картона на внутренней стенке первоначально разряженной цилиндрической оболочки. Коллектор сразу же разряжается, о чем свидетельствует его вертикальная полоса. Внешняя полоса цилиндра, с другой стороны, немного приподнимается. Повторите этот процесс несколько раз, электризуя коллектор перед каждым контактом. Так можно значительно наэлектризовать цилиндр, как видно по его постепенно поднимающейся полоске. Каждый раз, когда электризованный коллектор касается внутренней стенки цилиндра, он теряет почти весь свой заряд. Иногда его полоса остается немного наклонной относительно картона, что указывает на то, что он не потерял весь свой заряд. Он полностью потерял бы весь свой заряд, если цилиндр был бы полностью закрыт крышками сверху и снизу. Поскольку по крайней мере одна из этих крышек должна отсутствовать, чтобы обеспечить проход коллектора, иногда коллектор сохраняет небольшое количество своего заряда даже после касания внутренней стенки цилиндра.

Но даже когда этот факт имеет место, обратите внимание, что он потеряет почти всю свою электризацию, независимо от количества заряда, уже накопленного наэлектризованной цилиндрической оболочкой.

Предположим теперь, что электризованный коллектор заряда касается внешней стенки изначально нейтральной изолированной цилиндрической оболочки. Полоска сборщика заряда немного опускается, оставаясь наклонной относительно его картона. Внешняя полоса цилиндра немного приподнимается относительно цилиндрической оболочки. Повторите эту процедуру много раз, заряжая коллектор перед каждым контактом. Внешняя полоса цилиндрической оболочки поднимается понемногу. Полоска коллектора заряда никогда не падает полностью после каждого контакта, оставаясь всегда немного наклонной относительно его картона.

После определенного количества электризации цилиндра, вы достигаете точки насыщения. Коснитесь внешней стенки электризованного цилиндра заряженным коллектором. Заметьте, что ничего не происходит. То есть коллектор заряда остается наэлектризованным, а поднятая полоса цилиндра не меняет угол наклона относительно цилиндра. Больше нет обмена зарядами между этими двумя электризованными проводниками, поскольку обе полоски сохраняют свои углы наклона относительно своих картонов.

7.1.5 Распределение зарядов в открытых и закрытых проводниках

Предыдущие эксперименты показывают, что в изогнутом проводнике заряды расположены снаружи, на что указывает наклон полос на Рис. 7.4. Кроме того, поскольку внешние полоски на Рис. 7.4 находятся выше, чем обе полоски на Рис. 7.3, мы заключаем, что заряды, которые располагались на одной стороне прямоугольника, переместились на другую сторону, когда мы деформировали его в круглую полосу.

Рис. 7.15 (a) иллюстрирует качественное распределение зарядов на прямоугольном картоне на Рис. 7.3, как оно видно сверху.

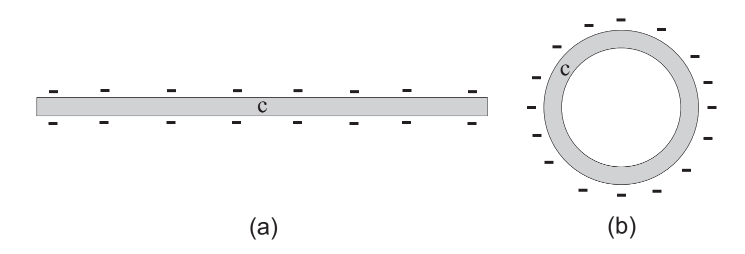


Рис. 7.15: (a) Качественное представление зарядов, распределенных на прямоугольном картоне на Рис. 7.3, вид сверху. (b) Распределение зарядов на цилиндрической оболочке рисунка 7.4, как видно сверху.

Буква “c” обозначает проводник, а именно картон. Мы преувеличиваем его толщину, чтобы указать распределение зарядов на его внешней поверх-

ности. Когда он принимает форму цилиндрической оболочки, как на Рис. 7.4, заряды, которые были расположены на одной стороне прямоугольника, перетекают на другую сторону. Когда система достигнет нового состояния равновесия, внутри цилиндрической оболочки не будет никаких зарядов – все заряды будут расположены снаружи, Рис. 7.15 (b).

7.2 Заряды наведенные на внутренних и внешних стенках полого проводника

Эксперимент 7.14 - *Электризованная линейка внутри цилиндрической оболочки*

Используйте проводящую цилиндрическую оболочку с тонкими полосками папиросной бумаги снаружи. Цилиндр изолирован от земли, когда он опирается на пластиковые соломки или покоится на плите из пенопласта. Первоначально он должен быть разряжен, Рис. 7.16 (a).

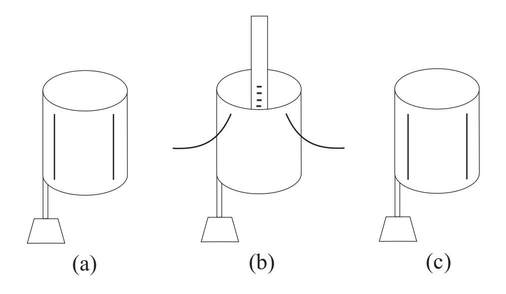


Рис. 7.16: (a) Разряженная и изолированная цилиндрическая оболочка. (b) Когда электрическая линейка помещается внутрь оболочки, не касаясь ее, полосы поднимаются. (c) Когда электризованная линейка выносится из оболочки, полосы падают.

Электризуйте отрицательно пластиковую линейку, потерев ее волосами или бумажной салфеткой. Внесите ее внутрь цилиндрической оболочки, не позволяя ей коснуться стенки. Полоски отходят от цилиндра, Рис. 7.16 (b). Когда линейка выносится, полосы возвращаются к своей первоначальной вертикальной ориентации вдоль цилиндрической оболочки, Рис. 7.16 (c).

Повторите этот эксперимент. На этот раз, пока наэлектризованная линейка находится внутри цилиндра, поднесите вторую отрицательно наэлектризованную линейку к одной из поднятых полос так, чтобы они не соприкасались. Обратите внимание, что поднятая полоса отталкивается электризованной линейкой, так как она стремится отойти от нее, наклонившись к цилиндру, Рис. 7.17 (a). Когда, с другой стороны, положительно заряженная линейка приближается к этой полосе, наблюдайте их притяжение, Рис. 7.17 (b).

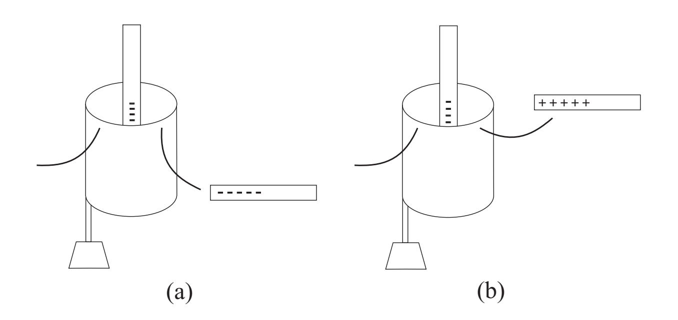


Рис. 7.17: (a) Полоска отталкивается от отрицательно заряженной линейки. (b) Полоска притягивается положительно заряженной линейкой.

Этот эксперимент иллюстрирует электрическую поляризацию. Цилиндрическая оболочка изолирована от земли. Когда в нее входит отрицательная линейка, внутренняя стенка цилиндра становится положительно электризованной, а внешняя стенка отрицательно электризуется.

Эксперимент 7.15 - *Заземление цилиндрической оболочки, когда электризованная линейка находится внутри нее*

Повторите эксперимент 7.14. Рис. 7.18 (a) иллюстрирует разряженную цилиндрическую оболочку, изолированную от земли.

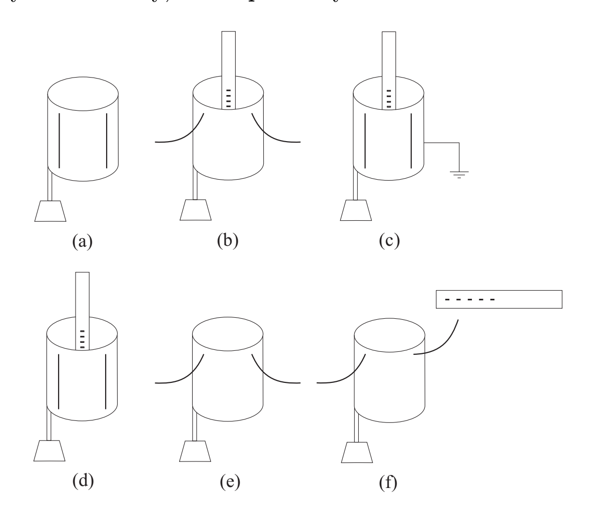


Рис. 7.18: электризация цилиндрической оболочки по индукции.

Рис. 7.18 (b) показывает поведение полос, когда отрицательная линейка входит внутрь оболочки. На этот раз, когда отрицательно электризованная линейка находится внутри цилиндра, заземлите оболочку. Его полосы падают, как показано на Рис. 7.18 (c). Удалите заземление, пока электризованная линейка остается внутри цилиндра. Его полосы остаются внизу,

Рис. 7.18 (d). При удалении линейки, полосы снова поднимаются, сохраняя наклон относительно цилиндра, Рис. 7.18 (e). Поднесите отрицательно наэлектризованную линейку к цилиндру. Она привлекает полосы, Рис. 7.18 (f).

Этот эксперимент иллюстрирует электризацию по индукции. В конце этой процедуры цилиндр электризуется зарядом со знаком, противоположным знаку линейки. Когда отрицательно наэлектризованная линейка вносится в цилиндр, происходит поляризация его зарядов. В частности, внутренняя стена становится положительно электризованной, в то время как внешняя стена становится отрицательной, 7.19 (a).

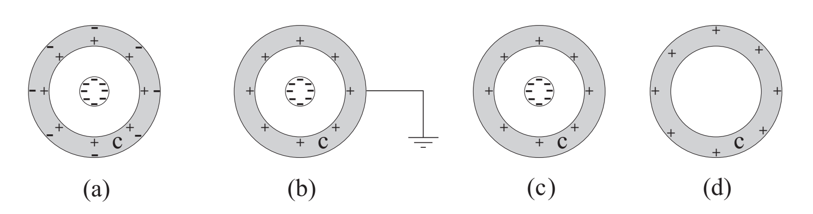


Рис. 7.19: (a) Полый проводник c изолирован от земли и поляризован из-за наличия внутри него отрицательно заряженного тела. (b) Заземленный проводник с нейтрализацией его внешней стенки. (c) Распределение зарядов не изменяется при удалении заземления. (г) При удалении внутреннего тела происходит перераспределение зарядов. Теперь они расположены только на внешней стенке.

Заземляя корпус, мы нейтрализуем электричество внешней стенки. Внутренняя стенка остается положительной из-за притяжения, оказываемого отрицательными зарядами линейки, Рис. 7.19 (b). Когда заземление снято, в распределении зарядов ничего не меняется, Рис. 7.19 (c). При удалении линейки происходит перераспределение зарядов на цилиндре. Положительные заряды теперь распределены только по его внешней стенке, Рис. 7.19 (d).

7.3 Действия, оказываемые полым электризованным проводником на внутренние и внешние тела

Эксперимент 7.16 - *Действие электризованной цилиндрической оболочки на внутренний электрический маятник*

Начните с проводящей цилиндрической оболочки, изолированной от земли соломкой, или когда она опирается на изолирующую пластину. Она должна быть изначально разряжена. Оболочка может быть изготовлена из бумаги или картона. Можно использовать также банку из под газировки. Верхний конец полоски из папиросной бумаги приклеен на внешней

стенке. Используйте также электрический маятник, состоящий из небольшого бумажного диска на шелковой нити. Этот маятник тоже должен быть изначально нейтральным. Диск маятника затем помещается внутрь цилиндрической оболочки, близко к ее стенке, но не касаясь ее, между ее верхним и нижним краями. 7.20 (a).

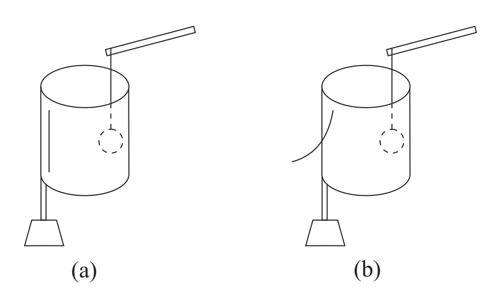


Рис. 7.20: (a) Изолированная цилиндрическая оболочка с внутренним электрическим маятником. (b) Бумажный диск не испытывает влияния при электризации цилиндрической оболочки.

Электрический маятник должен оставаться внутри корпуса, не касаясь его. Электризуйте оболочку, соскабливая натертой соломкой по верхнему краю. Ее можно наэлектризовать также, касаясь его верхнего края электризованным сборщиком заряда электрофора. На электризацию оболочки указывает ее приподнятая полоска. Внутренний маятник не подвержен воздействию электризованной цилиндрической оболочки. То есть он не притягивается и не отталкивается ее стенкой, Рис. 7.20 (b).

Эксперимент 7.17 - *Воздействие наэлектризованной цилиндрической оболочки на внешний электрический маятник*

Повторите эксперимент 7.16, на этот раз, начиная с маятника за пределами цилиндрической оболочки. Диск должен быть расположен близко к стене, не касаясь ее, Рис. 7.21 (a).

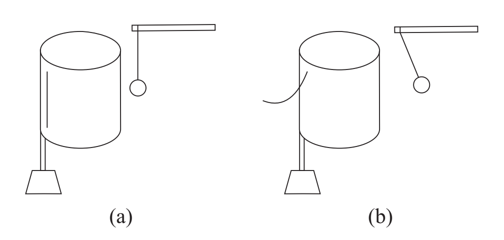


Рис. 7.21: (a) Проводящая цилиндрическая оболочка, изолированная от земли, с электрическим маятником снаружи. (b) Когда оболочка электризована, бумажный диск притягивается, касается цилиндра, а затем отталкивается от него по механизму ПКО.

Электризуйте оболочку, соскабливая натертой соломкой по ее верхнему краю или прикоснувшись к ней электризованным электрофором. Диск бумаги затем притягивается оболочкой. Он движется к нему и прилипает к ее стенке. Иногда он сразу освобождается, отталкиваясь от электризованной стенки согласно механизму ПКО. В других случаях это отталкивание имеет место только тогда, когда оболочка была значительно наэлектризована. Иногда нужно будет постучать по соломке, или слегка подуть на диск, чтобы освободить его от стенки. Затем понаблюдайте за его отталкиванием. Обычно это отталкивание наблюдается только при сильной электризации цилиндрической оболочки, как показано на рисунке. 7.21 (b).

7.4 Эксперимент Фарадея с ведром из под льда

Майкл Фарадей (1791-1867) провел в 1843 году эксперимент, аналогичный эксперименту 7.9. Он использовал металлическое ведро из под льда высотой 27 см и диаметром 18 см, изолированное от земли.[8] Его сборщик зарядов представлял собой круглый латунный шар, подвешенный на шелковой нити длиной от 90 до 120 см. На Рис. 7.22 ведро представлено буквой A, латунный шар – буквой B, а изоляция ведра и мяча – буквами I. Внешняя стенка ведра была подсоединена металлическим проводом к чувствительному электрометру с золотым листочком E.

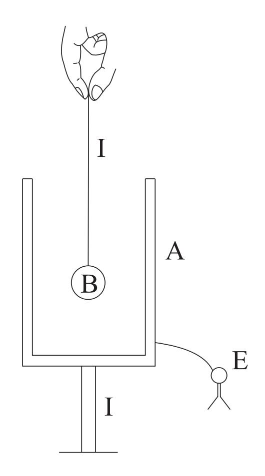


Рис. 7.22: Эксперимент Фарадея с ведром из под льда.

Когда ведро было разряжено, листья электроскопа висели вертикально. Когда положительно наэлектризованный шарик был введен в ведро, не касаясь его, листья электроскопа разошлись, указывая на то, что внешняя стенка ведра была электризована. Изучив заряд электроскопа, Фарадей пришел к выводу, что он также заряжен положительно. При удалении наэлектризованного шарика, листья электроскопа упали обратно. Медленно

[8] [Far43a].

вводя наэлектризованный шарик, он обнаружил, что расхождение листьев электроскопа увеличивалось до тех пор, пока сфера не оказалась примерно на 7,6 см ниже поверхности ведра, с сохранением угла расхождения при дальнейшем углублении. Этот факт указывал Фарадею на то, что все индуктивное воздействие сферы оказывалось на внутреннюю стенку ведра, а не на внешние объекты. Когда наэлектризованный шарик коснулся дна ведра, он заметил, что сфера полностью разряжена. Он пришел к выводу, что заряд, вызванный наэлектризованным шаром на внешней стороне ведра, имеет то же значение и знак, что и заряд, изначально находившийся на шаре. Аналогично, заряд, индуцированный на внутренней стенке ведра, имел ту же величину, что и шар, но противоположного знака. Когда наэлектризованный шарик коснулся дна сосуда, произошла нейтрализация между зарядами шарика и зарядами, расположенными на внутренней стенке получателя.

Он заменил бронзовый шарик электризованными кусочками шеллака, изоляционного материала. Они действовали в точности как металлические носители, производя те же эффекты. Было только одно исключение, а именно: их заряд не передавался металлическому сосуду при их соприкосновении.

Кроме того, он заметил, что внутренний наэлектризованный металлический шарик может быть расположен рядом с любой стороной сосуда, не влияя на расхождение электроскопа. Этот факт указывал Фарадею, что на распределение зарядов на внешней стенке ведра не влияло положение наэлектризованного тела внутри него. Этот вывод иллюстрируется на Рис. 7.23.

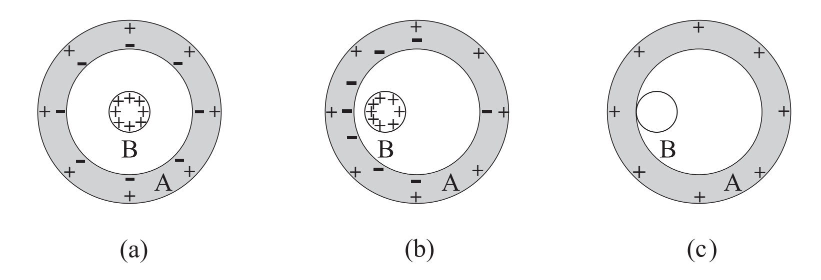


Рис. 7.23: (a) Изолированное ведро A поляризовано присутствием наэлектризованного тела B внутри него. Распределение зарядов на внутренней и внешней стенках ведра имеет ту же величину, что и величина B. (b) Перераспределение зарядов происходит по внутренней стенке ведра, когда B находится близко к одной из его сторон. (c) Когда B касается ведра, происходит нейтрализация между его зарядом и зарядом на внутренней стенке ведра.

Рис. 7.23 (a) показывает положительно заряженное тело B в центре изолированного ведра A. Заряды, индуцированные на ведре, симметрично распределены по внутренней и внешней стенкам. Рис. 7.23 (b) показывает, что B ближе к одной стороне ведра. В этом случае происходит перераспределе-

ние зарядов только по внутренней стенке. Заряды на внешней стене не испытывают влияния. На этом рисунке мы также представили перераспределение зарядов на проводнике B. Рис. 7.23 (c) иллюстрирует нейтрализацию, которая происходит, когда B касается ведра. Его заряды нейтрализуются равными и противоположными зарядами, которые распределены по внутренней стенке ведра. И на этот раз заряды на внешней стене не затронуты.

Джеймс Клерк Максвелл (1831-1879), Джозеф Джон Томсон (1856-1940) и Джеймс Х. Джинс (1877-1946) использовали этот эксперимент для придания количественной формы концепции заряда.[9] Угол раскрытия листьев электроскопа будет показателем количества заряда на теле, расположенном внутри ведра. Предположим, что тело A создает угол раскрытия θ_A, когда оно находится внутри контейнера. Предположим, что тело B создает угол раскрытия θ_B, когда оно находится внутри контейнера. Если $\theta_A = \theta_B$, мы говорим, что тела A и B имеют заряды одинаковой величины. Два тела будут иметь равные и противоположные заряды, если при одновременном введении в ведро они не вызывают расхождения электроскопа. Следуя этой процедуре, мы также можем определить положительные и отрицательные заряды, а также кратные любому заряду. Например, предположим, что тело C создает угол раскрытия θ_C, когда оно находится внутри контейнера. Если θ_C равен углу раскрытия электроскопа, когда внутри ведра находятся только A и B, а A и B имеют заряды одинаковой величины и одинакового знака, мы говорим, что заряд C в два раза больше заряда тела A. И так далее.

[9] [Max54a, статьи 27-36, стр. . 32-41], [Tho21, стр. 5-6] и [Jea27, стр. 7-10].

Глава 8

Электрическое экранирование

8.1 Размещение проводника или изолятора между наэлектризованным телом и легким телом

Эксперимент 8.1 - *Попытка привлечь кусочки бумаги электризованной линейкой, когда между ними находится металлическая сетка.*

Повторите эксперимент с янтарным эффектом. Потрите пластиковую соломку или акриловую линейку волосами, бумажной салфеткой или хлопковой тканью. Предположим, что потертая акриловая линейка притягивает расположенные на столе кусочки бумаги на расстоянии меньше 5 см.

Поместите металлическое сито (дуршлаг) над кусочками бумаги. Поднесите потертую линейку над ситом. На этот раз кусочки бумаги не тянутся к линейке, даже если расстояние между линейкой и кусочками бумаги меньше 5 см.

Эксперимент 8.2 - *Попытка привлечь кусочки бумаги электризованной линейкой, когда между ними находится пластиковое сито.*

Используйте теперь пластиковый фильтр. Сначала убедитесь, что сетчатый фильтр действительно действует как изолятор. То есть он не должен разряжать электризованный электроскоп. Мы покрываем куски бумаги этим пластиковым фильтром. Поднесите натертую акриловую линейку над фильтром. Кусочки бумаги притягиваются потертой линейкой, когда они находятся на расстоянии 5 см или меньше. Иногда притяжение немного меньше, чем в ситуации без пластикового сита, поэтому теперь расстояние между линейкой и кусочками бумаги должно быть меньше 5 см, чтобы создать ощутимое притяжение.

Определение 8.1

Эти эксперименты показывают, что если поместить заземленный проводник между наэлектризованным телом и кусочками бумаги, кусочки бумаги остаются в покое, даже когда наэлектризованное тело находится рядом с ними. Это явление называется *электростатическим экранированием* или *электрическим экранированием*.
Экранирование исчезает при замене заземленного провода изолятором. В этом случае кусочки бумаги будут двигаться к наэлектризованному телу, если они находятся достаточно близко.

Эксперимент 8.3 - *Попытка привлечь бумажный диск электрического маятника электризованной линейкой, когда между ними есть лист бумаги*

Используйте классический электрический маятник с диском из бумаги или алюминиевой фольги на шелковой нити. Он должен быть изначально разряжен. К маятнику подносится потертая соломка или пластиковая линейка. Бумажный диск начинает двигаться к потертой соломке, когда расстояние составляет примерно 10 см, Рис. 8.1 (a).

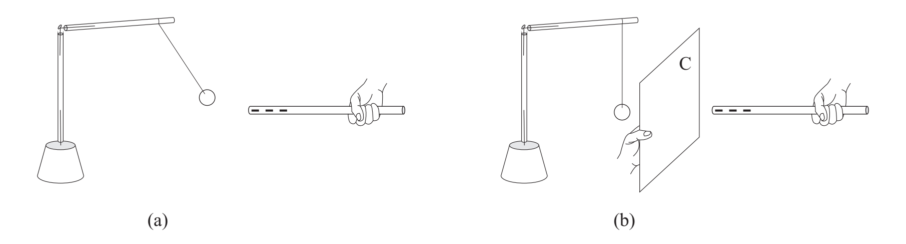


Рис. 8.1: (a) Потертый пластик, притягивающий бумажный диск электрического маятника. (b) Притяжение исчезает, если поместить проводящий лист бумаги C между маятником и натертым пластиком.

Не допускайте контакта между бумажным диском и натертой соломкой. Однако иногда они касаются друг друга, и маятник начинает отталкиваться от соломки по механизму ПКО. В этом случае разрядите маятник касанием пальца.

Начните еще раз с разряженного маятника. На этот раз держите лист бумаги формата А4 между маятником и натертой соломкой. Бумага должна быть расположена вертикально и не должна касаться диска, с центром примерно в 5-ти см от диска маятника. Медленно поднесите натертую соломку или пластиковую линейку к маятнику, с бумагой между ними. Диск не движется в сторону натертой соломки, даже если расстояние между ними равно 10 см или даже меньше, Рис. 8.1 (b). Иногда лист бумаги притягивается натертой соломкой. Даже когда такое притяжение имеет место,

маятник остается висеть вертикально в состоянии покоя на другой стороне листа.

Суммарная сила, действующая на бумажный диск, будет равна нулю при замене листа бумаги на металлический экран такого же размера. Диск бумаги останется в покое, если между диском и натертым пластиком поместить заземленный проводник. Этот заземленный проводник не должен быть сплошным. Он может иметь отверстия как в обычной сетке, при условии, что эти отверстия не очень большие.

Эксперимент 8.4 - *Попытка привлечь бумажный диск электрического маятника электризованной линейкой, когда между ними есть пластиковый лист*

Замените лист бумаги на прозрачный пластиковый лист того же размера. Держите натертую соломку или акриловую линейку на другой стороне пластикового листа. Диск маятника теперь притягивается натертой соломкой, когда они расположены рядом. 8.2.

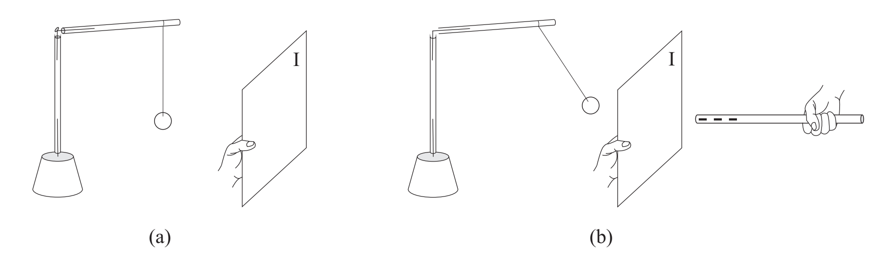


Рис. 8.2: (a) Изолирующий лист из пластика I рядом с разряженным маятником. (b) Диск притягивается натертой соломкой, расположенной с другой стороны пластикового листа.

Эксперимент 8.5 - *Попытка привлечь бумажный диск электрического маятника с помощью электризованной линейки, когда маятник находится внутри чашки, изготовленной из платины или стекла*

Мы можем провести еще один простой и интересный эксперимент, используя две прозрачные чашки одинакового размера и формы, одну из пластика, а другую из стекла. Предположим, у нас есть чашки диаметром от 6 до 8 см и высотой от 7 до 10 см. Пластик должен вести себя как хороший изолятор, а стекло – как хороший проводник. Перед началом эксперимента следует проверить изоляционные и проводящие свойства пластиковых и стеклянных материалов в соответствии с процедурой раздела 3.1. Зарядите электроскоп. Держите пластиковый стакан в руке и прикоснитесь им к картону. Если электроскоп остается наэлектризованным более 20 секунд, этот пластиковый стаканчик можно использовать в эксперименте. Повторите процедуру со стеклянной чашкой. Если электроскоп разряжается менее

чем через 3 секунды после контакта, этот стеклянный стакан можно использовать в эксперименте.

Эксперимент должен начаться с пластикового стакана. Закрепите небольшой бумажный диск на конце шелковой нити длиной 5 см. Зафиксируйте свободный конец нити во внутренней части чашки. Используйте клей или небольшой кусочек клейкой ленты, чтобы закрепить его на дне чашки. Нить должна висеть на расстоянии 1 или 2 см от одной стороны чашки, то есть она не должна располагаться в центре. Затем поставьте чашку на стол в перевернутом положении. Маятник висит вертикально, а бумажный диск не должен касаться ни стола, ни чашки. Наэлектризуйте акриловую линейку трением. Когда электризованная линейка находится далеко от чашки, маятник остается в вертикальном положении, Рис. 8.3 (a). Поднесите электризованную линейку к чашке на той же высоте, что и бумажный диск. Маятник движется к линейке, касаясь края чашки, Рис. 8.3 (b). С удалением линейки, маятник возвращается в вертикальное положение, Рис. 8.3 (c).

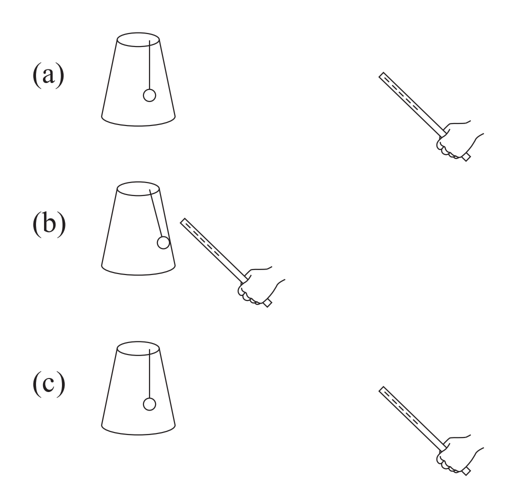


Рис. 8.3: Пластиковая чашка вверх дном с электрическим маятником внутри. (a) Наэлектризованная линейка находится далеко от маятника. (b) Когда линейка приближается к чашке, диск притягивается и касается края чашки. (c) С удалением линейки, маятник возвращается к вертикали.

Если этот эксперимент был успешным, мы можем продолжить. Повторите эту процедуру со стеклянной чашкой. На этот раз маятник остается висеть вертикально, независимо от того, находится наэлектризованная линейка близко или далеко, Рис. 8.4.

Маятник также остается в покое при замене стеклянной чашки металлической сеткой, имеющей размер и форму чашки. В этом случае рука должна двигаться медленно, когда электризованная линейка подносится к сетке, чтобы исключить влияние воздушных потоков на маятник. Иногда возникает небольшое движение маятника, когда электризованная линейка

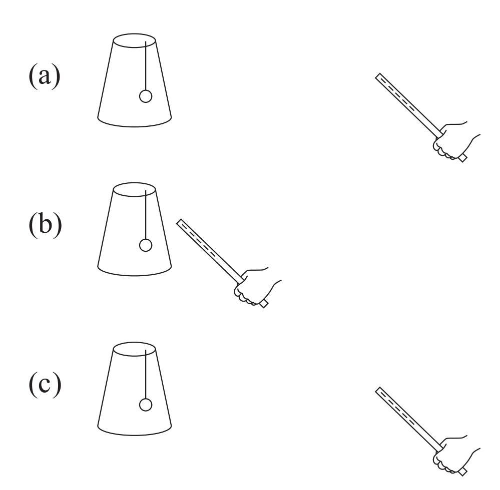


Рис. 8.4: Стеклянная чашка с электрическим маятником внутри. (a) Наэлектризованная линейка далеко от маятника. (b) Когда линейка приближается к чаше, маятник остается в вертикальном положении. (c) При удалении линейки маятник остается в вертикальном положении.

подходит к сетке, хотя она не касается ее стороны, как это было на рисунке. 8.3 (b).

8.1.1 Некоторые ранние исследования по экранированию

Джироламо Кардано (1501-1576) составил каталог различий между электрическими и магнитными явлениями в своей книге 1550 года. Он заметил, что магнетит (природный магнит) притягивает железо несмотря на вставленные между ними предметы, а натертый янтарь не притягивает легкие тела, если между ними есть другие предметы.[1] Уильям Гильберт обсуждал эти явления в своей книге 1600 года:[2]

> Во всех телах повсюду представлены две причины или два принципа, посредством которых создаются тела, а именно, *материя* и *форма*. Электрические движения происходят от *материи*, но магнитные просто от *формы*; и эти две сущности сильно отличаются друг от друга и ведут себя по разному – одна облагорожена многими добродетелями и обладает мощью; другая низкого рода с меньшей силой, и как бы стеснена определенными рамками; поэтому ее сила должна быть разбужена трением до тех пор, пока вещество не достигнет умеренной температуры и не испустит эфлувию, и его поверхность не станет сияющей. Влажный воздух, дующий на него изо рта, или поток влажного атмосферного воздуха душат его силы; и если вставить лист бумаги

[1][Hei99, п. 174].
[2][Gil78, стр. 30], [Gil00, стр. 52-53] и [Hei99, стр. 174].

> или льняную ткань, движение не происходит. Но магнетит, не натертый и не нагретый, и даже при том, что он пропитан жидкостью, будь то в воздухе или воде, притягивает магнитные тела, даже если между ними стоят самые твердые тела или доски, или толстые каменные или металлические плиты.

Оноре Фабри (1607-1688) и ученые из Accademia del Cimento (Экспериментальная Академия) разработали эти эксперименты между 1657 и 1667 годами.:[3]

> По словам Диариста, мотивом для исследования экранирующих тел было обнаружение «сопротивления, достаточного для предотвращения притяжения янтаря». Академики начали с того, что вставили листы бумаги, проколотые сначала тонкой иглой, затем концами ножницами и, наконец, большим гвоздем. Размер дыр увеличивался; однако притяжение не росло.

Фабри и другие ученые исследовали также экранирование жидкостей. Они упоминают, что натертый янтарь теряет электричество при увлажнении водой, но сохраняет его при покрытии маслом.[4]

В работе 1731 года Стивен Грей упоминает важный эксперимент своего друга Granville Wheler (1701-1770). Потертая стеклянная трубка притягивала нить (вероятно, хлопчатобумажную или льняную нить, то есть проводящий материал) через пять наложенных друг на друга слоев стекла.[5] Следует еще раз подчеркнуть, что стеклянные предметы, использованные Греем и его сотрудниками, вели себя как хорошие изоляторы.

Gianfrancesco Cigna (1734-1790) пишет в своей докторской диссертации 1757 года, что притяжения возникают между заряженными телами, погруженными в масло. Об этом факте писал также Алессандро Вольта.[6]

Все эти важные факты были убедительными аргументами против теорий эффлювии, испускаемой натертым янтарем. Эти факты также подорвали предполагаемое существование атмосфер вокруг наэлектризованных тел.[7]

Эти эксперименты были окончательно поняты только после открытия проводников и изоляторов, существования двух видов электричества и знания об эффектах электрической поляризации в проводниках и изоляторах. Вода, например, ведет себя как проводник в электростатике. Масло, с другой стороны, ведет себя как изолятор.

8.2 Эксперименты с полыми проводниками

Проведите теперь некоторые эксперименты с полыми проводниками, как описано в разделе 7.2.

[3] [Hei99, стр. 201].
[4] [Hei99, стр. 195-196 и 200-201].
[5] [Grae, стр. 399], [Bos11, стр. 253-255], [BAC12, стр. 194-199] и [Hei99, стр. 249].
[6] [Hei99, стр. 406, 413 и 415].
[7] [Hei99, главы V и XVII].

Эксперимент 8.6 - *Попытка привлечь внешнюю полосу цилиндрической оболочки с помощью электризованной линейки*

Начните с изолированной и разряженной цилиндрической оболочки. На внешней стенке цилиндра должна быть наклеена одна или несколько тонких полосок тонкой бумаги за их верхние концы, Рис. 8.5 (a).

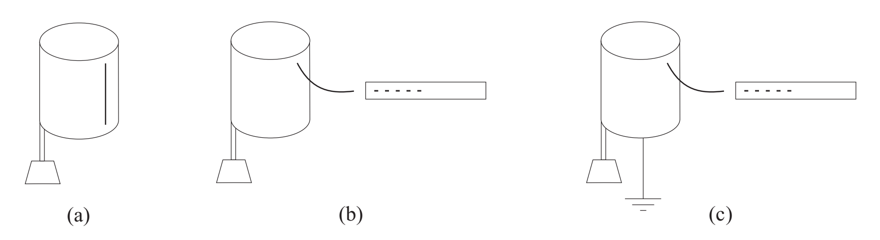


Рис. 8.5: (a) Разряженная цилиндрическая оболочка. (b) Внешняя полоса притягивается потертой акриловой линейкой. (c) При заземлении цилиндра, притяжение остается.

Соломка или пластиковая линейка отрицательно наэлектризована трением в волосах, бумажной салфетке или хлопковой ткани. Натертая соломка подносится близко к цилиндру. Пока она не должен касаться ни цилиндра, ни его полос. Близко расположенная полоса притягивается натертой соломкой, Рис. 8.5 (b). Даже когда цилиндр заземлен (например, касанием его верхней кромки пальцем), полоса остается притянутой натертой соломкой, Рис. 8.5 (c).

Полоска папиросной бумаги также притягивается соломкой при проведении этой процедуры в обратном порядке. То есть сначала заземлить цилиндр, затем поднести к нему натертую соломку.

Эксперимент 8.7 - *Попытка привлечь внутреннюю полоску цилиндрической оболочки с помощью электризованной линейки*

Повторите эксперимент 8.6, но теперь с полосами, наклеенными на внутренней стенке изолированной цилиндрической оболочки, Рис. 8.6 (a).

Поднесите натертую соломку или акриловую линейку к цилиндру. Его внутренние полосы остаются висеть вертикально в покое, Рис. 8.6 (b). Они остаются в состоянии покоя, когда цилиндр заземлен, Рис. 8.6 (c).

Внутренние полосы остаются в покое, когда процедура проводится в обратном порядке. То есть сперва идет заземление цилиндра, затем к нему подносится натертая соломка.

Эксперимент 8.8 - *Попытка привлечь электрический маятник внутри цилиндрической оболочки*

Используйте проводящую и изолированную цилиндрическую оболочку, первоначально разряженную. Проводящий бумажный диск электрического маятника расположен внутри него, близко к стенке, но не касаясь его,

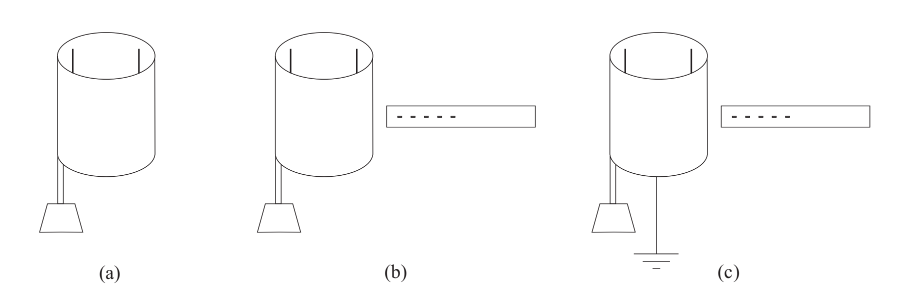


Рис. 8.6: (a) Разряженная цилиндрическая оболочка. (b) Внутренние полосы остаются в покое, когда натертая соломка или акриловая линейка подносится близко к цилиндру. (c) Они остаются вертикальными, когда цилиндр заземлен.

между его верхним и нижним краями. Натертая соломка или акриловая линейка подносится к диску снаружи. Диск не тянется к натертой соломке, даже когда они находятся близко друг к другу, Рис. 8.7 (a). Иногда верхний край цилиндра слегка притягивает шелковую нить маятника. Обратите внимание, что даже в этом случае притяжение действует на нить, а не на внутренний бумажный диск.

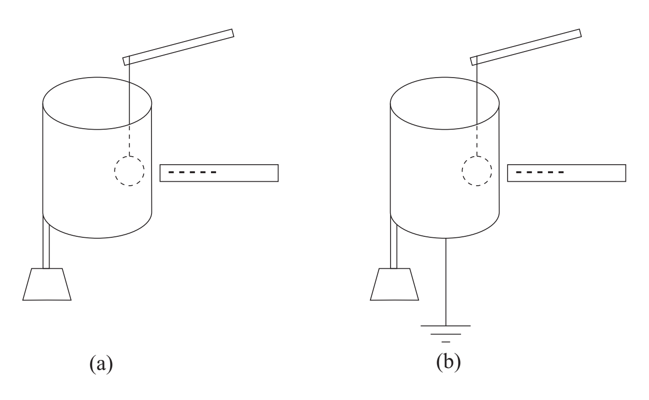


Рис. 8.7: (a) Бумажный диск с электрическим маятником не движется в направлении расположенной рядом внешней натертой соломки или акриловой линейки. (b) При заземлении цилиндра, маятник остается в вертикальном положении в покое.

При заземлении цилиндрической оболочки, маятник остается вертикально висеть в покое, Рис. 8.7 (b).

Эксперимент 8.9 - *Попытка привлечь электрический маятник вне цилиндрической оболочки*

Повторите эксперимент 8.8, но теперь с маятником вне оболочки. Цилиндр должен быть изначально разряжен и изолирован от земли. Маятник должен быть расположен очень близко к оболочке, но не касаясь ее. Бумажный диск должен быть расположен посередине между верхним и нижним

краями. Отрицательно натертая соломка или акриловая линейка медленно подносится к другой стороне цилиндра, а ее натертая часть находится на той же высоте, что и бумажный диск. Когда она находится очень близко к оболочке, не касаясь ее, диск притягивается оболочкой, касается ее, а затем отталкивается по механизму ПКО, Рис. 8.8.

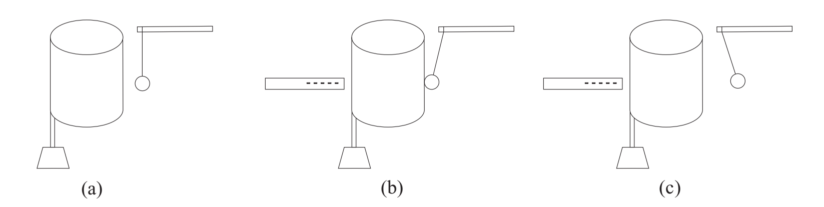


Рис. 8.8: (a) Внешний электрический маятник вблизи цилиндрической оболочки. (b) и (c): Поднесите натертую соломку или акриловую линейку к другой стороне цилиндра. Диск притягивается цилиндром, касается его, а затем отталкивается.

Изучая заряд наэлектризованного диска, мы обнаруживаем, что он имеет тот же знак, что и заряд наэлектризованной линейки. Иногда диск прилипает к цилиндру после контакта. Вы можете освободить его, постукивая по соломе, поддерживающей цилиндр, или слегка подув на диск. Его можно освободить также, сперва удалив натертую соломку, затем поднося ее близко к другой стороне цилиндра.

Однако, когда цилиндрическая оболочка изначально заземлена, механизм ПКО не работает. Поднесите натертую акриловую линейку к оболочке. Обратите внимание, что маятник, расположенный рядом с другой стороной, остается вертикально в покое, Рис. 8.9.

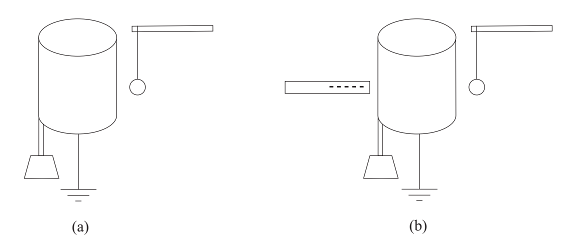


Рис. 8.9: Механизм ПКО не работает, когда натертая акриловая линейка приближается к другой стороне изначально заземленной цилиндрической оболочки.

Эксперимент 8.10 - *Электризованная линейка внутри цилиндрической оболочки и электрический маятник снаружи*

Используйте еще раз проводящую цилиндрическую оболочку. Она изолирована и изначально разряжена. Потертая часть отрицательно заряжен-

ной пластиковой линейки находится внутри оболочки. Она должна находиться близко к стене, но не касаясь ее. Диск электрического маятника должен быть вне оболочки, вдали от нее и на той же высоте, что и электризованная линейка, Рис. 8.10 (a).

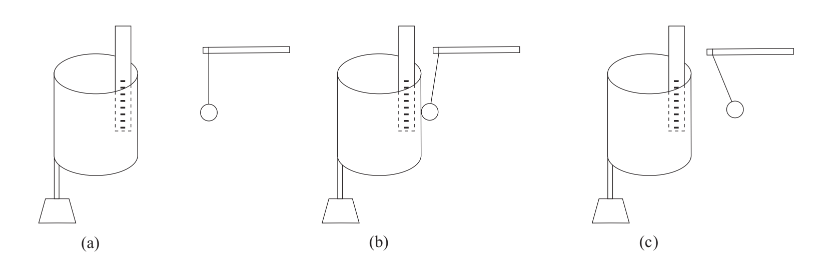


Рис. 8.10: (a) Электрический маятник вдали от изолированной цилиндрической оболочки с внутренней электризованной акриловой линейкой. (b) и (в): Когда маятник приближается к линейке, он притягивается к оболочке, касается ее, а затем отталкивается.

Держите маятник за его опору или соломку, медленно приближая его к цилиндру. Когда он находится очень близко к оболочке, его диск притягивается к потертой акриловой линейке, касается оболочки, а затем отталкивается от нее по механизму ПКО, Рис. 8.10 (b) и (c). Изучая его заряд, мы находим, что теперь он электризован зарядами того же знака, что и внутренняя линейка.

Повторите этот эксперимент, но теперь с изначально заземленной цилиндрической оболочкой. Поднесите маятник к натертой акриловой линейке. Обратите внимание, что маятник остается в вертикальном положении. То есть его диск не испытывает влияние механизма ПКО, Рис. 8.11.

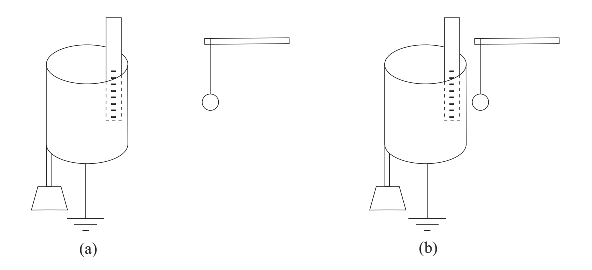


Рис. 8.11: (a) Электрический маятник вдали от заземленной цилиндрической оболочки с внутренней электризованной акриловой линейкой. (b) Когда маятник приближается к линейке, он не притягивается к ней.

8.3 Достаточные условия для эффективного экранирования

В этом подразделе обсуждаются некоторые ситуации, где есть эффективное экранирование, и другие ситуации, в которых нет эффективного экранирования.

В эксперименте 7.15 использовалась изолированная и проводящая цилиндрическая оболочка. Рис. 7.18 (b) показал, что при помещали в нее электризованной линейки, полосы, расположенные снаружи цилиндра, поднимались. Однако, когда цилиндр был заземлен, полосы упали, несмотря на присутствие внутренней электризованной линейки, Рис. 7.18 (c). Следовательно, замкнутый и заземленный проводник экранирует внешние воздействия, которые создавались бы внутренним наэлектризованным телом, если оболочка была бы изолирована от земли.

Такое же поведение можно наблюдать в эксперименте 8.10, сравнивая рисунки 8.10 и 8.11. Внутри замкнутого проводника имеется заряд. Когда проводник изолирован, он воздействует на диск маятника, который приближается к нему, что создает механизм ПКО. Однако, когда проводник заземлен, механизм ПКО не будет работать, даже если электрический маятник находится рядом с цилиндром.

В эксперименте 8.6, Рисунки 8.5 и 8.6, имеется проводящая цилиндрическая оболочка с внешним зарядом (потертая акриловая линейка). Когда электризованная линейка приближается к цилиндру, она влияет на внешние полоски папиросной бумаги, независимо от того, является цилиндр изолированным или заземленным. Внутренние полосы, с другой стороны, не подвержены влиянию, независимо от того, заземлен цилиндр или нет.

Такое поведение также можно наблюдать с электрическим маятником в эксперименте 8.8. У нас есть проводящая цилиндрическая оболочка с потертой акриловой линейкой снаружи. Электрический маятник находится внутри цилиндра. Его диск находится близко к одной из его сторон, не касаясь его, и расположен посередине между верхним и нижним краями. Даже когда электризованная линейка приближается к цилиндру, результирующая сила на диск равна нулю, так как он остается в покое, Рис. 8.7. Независимо от того, является цилиндр изолированным от земли или нет, внутренний диск не испытывает никакого суммарного воздействия.

В эксперименте 8.9 натертая акриловая линейка находится вне изолированной проводящей оболочки. Это влияет на внешний электрический маятник, расположенный на другой стороне цилиндра. Когда натертая линейка приближается к цилиндру, диск маятника следует механизму ПКО, Рис. 8.8. С другой стороны, для заземленной цилиндрической оболочки механизм ПКО не работает, Рис. 8.9.

В итоге мы заключаем, что нет никакого суммарного воздействия на внешние электризованные тела, когда есть заряды, расположенные внутри замкнутого и заземленного проводника (под суммарным эффектом мы подразумеваем результирующий или полный эффект). В этой ситуации имеет

место эффективное электрическое экранирование. Также нет никакого влияния на внутренние заряды, когда наэлектризованные тела находятся вне замкнутого проводника, независимо от того, заземлен проводник или нет.

Тем не менее, есть суммарное влияние на внешние заряды, когда внутри изолированного и замкнутого проводника есть наэлектризованные тела.

Такое поведение можно объяснить распределением зарядов на внутренней и внешней поверхностях полых проводников. Сначала рассмотрим экранирование, происходящее снаружи замкнутого и изолированного проводника с внутренним зарядом. Рассмотрим проводник как полую сферу, изначально разряженную и изолированную от земли. Предположим, что внутри оболочки имеется суммарный отрицательный заряд $-Q$. Наличие этого заряда поляризует оболочку. Ее внутренняя стенка становится положительно электризованной, в то время как его внешняя стенка становится отрицательно электризованной, Рис. 8.12 (a). Заземляя проводник, мы нейтрализуем распределение зарядов на его внешней стенке, Рис. 8.12 (b).

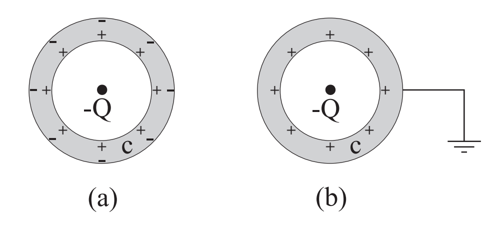


Рис. 8.12: (a) Изолированный проводник c поляризуется из-за наличия внутреннего отрицательного заряда $-Q$. (b) Заземленный проводник с нейтрализованной внешней стенкой.

Предположим, что тело заряжено положительным зарядом q и расположено вне заземленного проводника, показанного на Рис. 8.12 (b). Предположим, что $q \ll Q$, и пренебрежем поляризацией зарядов, индуцированных на проводнике ввиду наличия этого внешнего заряда q. На внешнее тело действуют две силы: сила притяжения F_A, создаваемая внутренним телом, наэлектризованным зарядом $-Q$, и сила отталкивания F_R всех зарядов, распределенных на внутренней стенке проводника. Эти две силы имеют одинаковую величину, но действуют в противоположных направлениях, т. е. они нейтрализуют друг друга, Рис. 8.13.

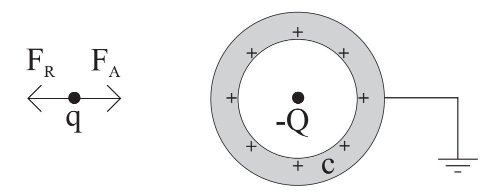


Рис. 8.13: Силы притяжения и отталкивания F_A и F_R, действующие на тело, наэлектризованное зарядом q.

Важно замечание: только *суммарная или результирующая сила*, действующая на заряд q, расположенный вне заземленного проводника, обращается в нуль. Несмотря на этот факт, наличие проводника не устраняет силу притяжения F_A, создаваемую внутренним зарядом $-Q$. Когда проводник заземлен, также будет существовать сила отталкивания F_R, вызванная положительными зарядами на внутренней стенке сферической оболочки. Эти две силы имеют одинаковую величину, но противоположные направления, нейтрализуя друг друга.

Рис. 8.14 (a) показывает силу притяжения F_A, оказываемую $-Q$ на q, разделенную расстоянием d, когда между этими зарядами нет других тел. Если вокруг $-Q$ имеется заземленный проводник, как на Рис. 8.14 (b), сила притяжения, с которой $-Q$ действует на q, остается точно такой же, как ранее, с той же величиной и направлением, при условии, что $-Q$ и q остаются на том же расстоянии d. Однако, *результирующая сила*, действующая на q в последней ситуации, стремится к нулю из-за присутствия силы отталкивания F_R, создаваемой положительными зарядами, распределенными по внутренней стенке проводника. Эта сила отталкивания F_R не была представлена на Рис. 8.14 (b). Сила реакции, оказываемая q на $-Q$, определяется выражением $-F_A$, где F_A представлена на Рис. 8.14 (a) и (b). Сила реакции $-F_A$ на этом рисунке не представлена.

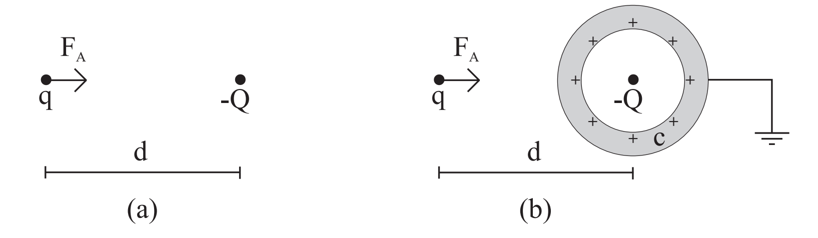


Рис. 8.14: (a) Сила притяжения F_A, оказываемая $-Q$ на q, разделенные расстоянием d, когда между ними нет тел. (b) Сила притяжения F_A, оказываемая $-Q$ на q, остается неизменной, когда вокруг $-Q$ имеется заземленный проводник, при условии, что $-Q$ и q остаются на том же расстоянии d.

Рассмотрим экранирование, которое происходит внутри замкнутого проводника, когда снаружи находится электризованное тело, а сам провод изолирован или заземлен. Рассмотрим еще раз сферический проводник, первоначально разряженный и изолированный. Рассмотрим ситуацию, когда тело, отрицательно наэлектризованное зарядом $-Q$, находится вне оболочки. Это внешнее тело поляризует внешнюю стенку изолированной оболочки, Рис. 8.15 (a). Заземляя оболочку, мы нейтрализуем заряды, которые изначально были распределены по внешней стенке вблизи места заземления. Более того, другие заряды, остающиеся на поверхности оболочки, теперь перераспределяются (по сравнению с предыдущим распределением зарядов на изолированной сфере), Рис. 8.15 (b).

Предположим теперь, что внутри проводника, показанного на Рис. 8.15

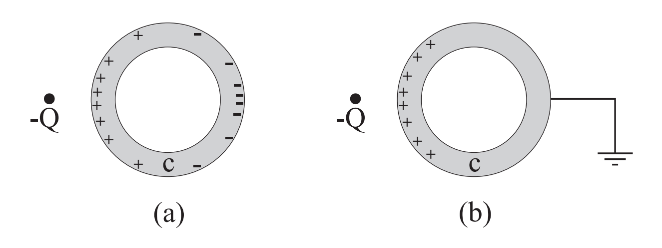


Рис. 8.15: (a) Изолированный проводник c с его поляризованной внешней стенкой из-за присутствия отрицательного тела $-Q$ вне проводника. (b) Заземленный проводник, показывающий нейтрализацию зарядов вблизи места заземления и перераспределение оставшихся зарядов.

(a), имеется тело, наэлектризованное положительным зарядом q. Еще раз предположим, что $q \ll Q$, и пренебрегаем поляризацией, индуцированной в оболочке наличием этого внутреннего заряда q. Есть три силы, действующие на тело, наэлектризованное положительным зарядом q, а именно: сила притяжения F_A, направленная влево и оказываемая внешним отрицательным телом, наэлектризованным зарядом $-Q$, сила отталкивания F_1, указывающая направо и вызванная положительными зарядами, распределенными по внешней стенке проводника, вместе с силой притяжения F_2, направленной вправо и оказываемой отрицательными зарядами, распределенными по внешней стенке проводника. Эти три силы уравновешивают друг друга, так что $|\vec{F}_A| = |\vec{F}_1 + \vec{F}_2|$, с нулевой результирующей силой на внутренний заряд q, Рис. 8.16 (a).

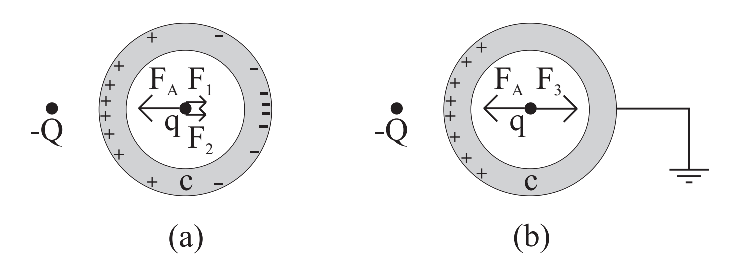


Рис. 8.16: (a) Силы, действующие на заряд q, находящийся внутри изолированного проводника, как показано на Рис. 8.15 (a), $|\vec{F}_A| = |\vec{F}_1 + \vec{F}_2|$. (b) Силы, действующие на заряд q, расположенный внутри заземленного проводника рисунка 8.15 (b), $|\vec{F}_A| = |\vec{F}_3|$.

Что касается заземленного проводника, показанного на Рис. 8.15 (b), на внутренний заряд q действуют две равные и противоположные силы, а именно сила притяжения F_A, указывающая налево и вызванная внешним зарядом $-Q$, вместе с силой отталкивания F_3, направленной вправо и оказываемой положительными зарядами, распределенными по внешней стенке проводника, Рис. 8.16 (b). Эти две силы имеют одинаковую вели-

чину, но противоположные направления, взаимно уничтожая друг друга, $|\vec{F}_A| = |\vec{F}_3|$.

Суммарная или результирующая сила, действующая на внутренний заряд q, стремится к нулю в обеих ситуациях, показанных на Рис. 8.16. Однако здесь важно подчеркнуть, что сила притяжения, оказываемая $-Q$ на q, всегда остается неизменной, независимо от наличия или отсутствия проводника около q. Сила притяжения F_A, оказываемая $-Q$ на q, всегда имеет одно и то же значение, независимо от распределения зарядов на внешней стенке проводника. Проводник может быть изолирован или заземлен, это не имеет значения. Сила притяжения между $-Q$ и q всегда остается неизменной. Наличие проводника не устраняет эту силу притяжения. Однако наличие проводника позволяет перераспределить заряды на его внешней стенке. Сила, оказываемая этими поверхностными зарядами на q, имеет ту же величину, что и сила, с которой $-Q$ действует на q, но действует в противоположном направлении, так что они взаимно компенсируют друг друга.

Рис. 8.17 (a) показывает силу притяжения F_A, оказываемую $-Q$ на q, разделенных расстоянием d, когда между ними нет других тел. Эта сила остается той же самой, когда есть изолированный проводник около q, Рис. 8.17 (b). Сила притяжения F_A, оказываемая $-Q$ на q, также остается такой же, как и раньше, когда заземленный проводник находится около q, Рис. 8.17 (c). На этом рисунке не показаны силы, действующие на q от зарядов, распределенных на внешней стенке проводника. Сила реакции, оказываемая q на $-Q$, определяется как $-F_A$ в ситуациях (a), (b) и (c) на Рис. 8.17. Эта сила реакции также не представлена на этом рисунке.

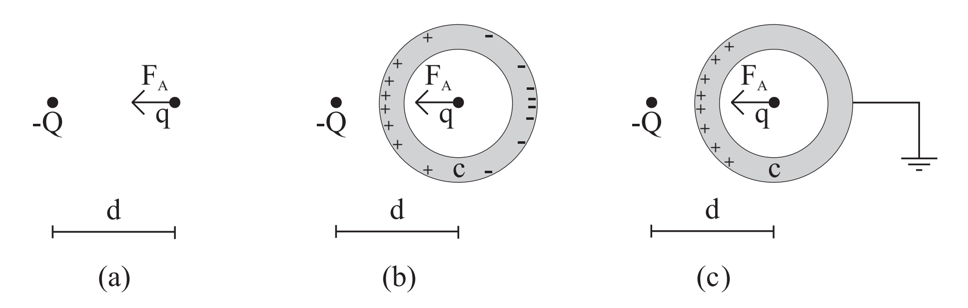


Рис. 8.17: (a) Сила притяжения F_A, оказываемая $-Q$ на q, разделенных расстоянием d, когда между ними нет других тел. (b) Эта сила остается той же самой, когда есть изолированный проводник около q. (c) Эта сила остается той же самой, когда есть заземленный проводник около q.

Рисунки 8.13 и 8.14 показывают, что наличие заземленного проводника дает *эффективное экранирование*. Нет *суммарной или результирующей силы*, воздействующей на наэлектризованную частицу, расположенную вне заземленного проводника, когда внутри него имеется наэлектризовано тело. Однако не существует *реального экранирования* силы, оказываемой внут-

ренним электризованным телом, действующим на внешнее тело. Эта сила всегда остается неизменной, независимо от того, присутствует или отсутствует заземленный проводник. Тот же вывод можно сделать, сравнивая рисунки 8.16 и 8.17. В этой последней ситуации также существует *эффективное экранирование*, поскольку *суммарная или результирующая сила*, действующая на тело внутри заземленного проводника, стремится к нулю. Однако, опять же, не существует действительного экранирования силы, оказываемой внешним зарядом, действующим на внутреннее электризованное тело. Эта последняя сила всегда действует с одинаковой интенсивностью, независимо от того, присутствует или отсутствует заземленный проводник.[8]

8.4 Клетка Фарадея

Майкл Фарадей провел несколько очень интересных экспериментов, используя аппарат известный как *клетка Фарадея*. Это пустотелый проводник. Вот как Фарадей описывает свои наблюдения:[9]

> 1173. Я проводил эти эксперименты с воздухом очень развернуто. Я построил камеру в форме куба размером в двенадцать футов. Был построен небольшой кубический деревянный каркас, и медная проволока проходила вдоль и поперек него в различных направлениях так, чтобы стороны образовали большую сеть, а затем все было покрыто бумагой, тесно облегая провода, и наложены в каждом направлении полосами из оловянной фольги, чтобы придать целому хорошую металлическую связь со свободный проводимостью во всех частях. Эта клетка была изолирована в аудитории Королевского института; [...]
>
> 1174. Я поместил чувствительный электрометр с золотыми листами в куб, а затем зарядил целое с помощью *наружней* проводки, очень сильно, в течение некоторого промежутка времени; но ни во время зарядки, ни после разряда электрометр и воздух внутри не показывали никаких признаков электричества. Я заряжал и разряжал все устройство различными способами, но я не мог получить ни малейшего указания на абсолютный заряд; или на наведенный заряд, в котором электричество одного вида имело наименьшее превосходство по количеству над другим. Я вошел в куб и провел там некоторое время, и, используя зажженные свечи, электрометры и все другие проверки электрического состояния, я не мог найти ни малейшего влияния на них, хотя все время снаружи куб был сильно заряжен, и из каждой части его внешней поверхности исходили большие искры и кисти. Я пришел к выводу, что непроводники, а также проводники, не получили посредством передачи абсолютного и независимого заряда одного электричества, и что, по-видимому, такое состояние вещества невозможно.

[8] [Roc89].

[9] [Far38, paragraphs 1173-1174, стр. 442-443].

Эксперименты из раздела 8.1 связаны с этими явлениями, наблюденными Фарадеем. В частности, внутри замкнутого проводника отсутствуют *суммарные*, *общие* или *результирующие* эффекты, связанные с наличием зарядов на поверхности проводника или вне его.

Глава 9

Сила острых точек

Существует ряд электрических эффектов, интенсивность которых значительно выше около заостренных участков проводников, чем в тупых или менее острых областях. Эти эффекты мы будем называть кратко *сила точек*. Вот краткий перечень подобных эффектов:

1. Электризованные частицы накапливаются с более высокой поверхностной плотностью в заостренных областях электризованных или поляризованных проводников.

2. Легкие тела, расположенные в заостренных областях проводников, с большей силой притягиваются другим электризованным телом.

3. Заостренные области проводников притягиваются или отталкиваются с большей интенсивностью другими наэлектризованными телами.

Мы проиллюстрируем эти свойства несколькими простыми экспериментами.

9.1 Иллюстрация силы точек с помощью электроскопов

Силу точек можно визуализировать, используя простые электроскопы из тонкого картона. Их форма должна быть похожа на теннисную ракетку, кухонную разделочную доску или остроконечную шляпу клоуна.[1] Мы предлагаем здесь конкретный размер, хотя наиболее важным аспектом для этих экспериментов является асимметричная форма картона, а не его размер. Картон прикреплен к пластиковой соломке двумя кусочками клейкой ленты, как простой электроскоп. Отрежьте две очень маленькие полоски папиросной бумаги шириной от 1 до 3 мм и длиной от 6 до 9 см. Они должны

[1] [FM91, стр. 60-61], [Ferb, Poder das pontas, p. 39] и [Gas03, стр. 239-243].

иметь одинаковые размер и толщину. Приклейте верхние концы этих полосок на электроскоп. Один из них приклеен к заостренной области картона, а другой – к основной его части, Рис. 9.1.

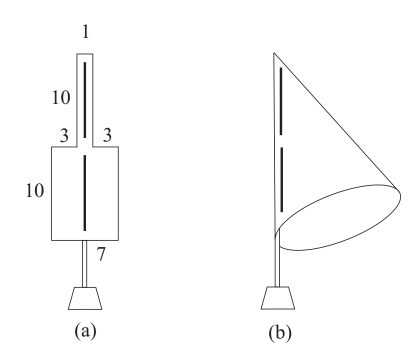


Рис. 9.1: (a) Электроскоп в форме разделочной доски. Приблизительные размеры в сантиметрах. (b) Электроскоп в форме шляпы клоуна.

Эксперимент 9.1 - *Зарядка асимметричного электроскопа*

Резко потрите соломку или акриловую линейку о волосы или листом бумаги. Поскоблите натертой соломкой несколько раз по верхнему краю этих электроскопов, пока они не приобретут достаточно большое количество электризации, как это будет видно по величине поднятия полос. Уберите натертую соломку подальше от электроскопа. Обратите внимание, что полоски папиросной бумаги, расположенные на заостренных участках электроскопов, поднимаются выше, чем другие полоски. То есть они отклоняются на более высокие углы относительно своих картонов, чем другие полоски, расположенные на тех же электроскопах, 9.2.

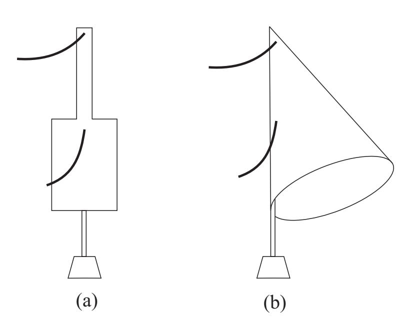


Рис. 9.2: Заряженные электроскопы. Полоски на заостренных участках отклоняются больше, чем другие полоски.

Том 1 этой книги показал, что угол наклона полоски папиросной бумаги электроскопа является качественным показателем электризации элек-

троскопа, то есть его поверхностной плотности заряда.[2] Чем больше он наэлектризован, тем выше поднимется его полоска.

Из настоящего эксперимента мы заключаем, что плотность поверхностного заряда в заостренной области заряженного электроскопа выше, чем плотность поверхностного заряда в остальной части, как показано на рисунке. 9.3.

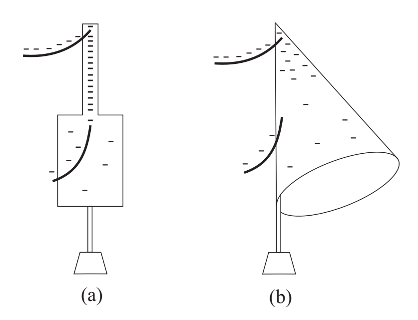


Рис. 9.3: Заряды сосредоточены на острых точках электризованных электроскопов.

Эксперимент 9.2 - *Зарядка длинной прямоугольной бумажной полоски*

Вырежьте картон шириной 10 см и длиной 1-2 метра. Вместо картона вы можете также использовать прямоугольники из бумаги формата A4 шириной 10 см, сшитые вместе, чтобы достичь длины 1-2 метра. Соломка должна быть закреплена на этом длинном прямоугольнике с помощью клейкой ленты таким образом, чтобы половина длины соломки оставалась за пределами прямоугольника. Затем соломки закрепляются на соответствующих опорах так, чтобы картон оставался в вертикальной плоскости. Приклейте верхние концы тонких полосок тонкой бумаги по всей длине картона, как показано на Рис. 9.4.

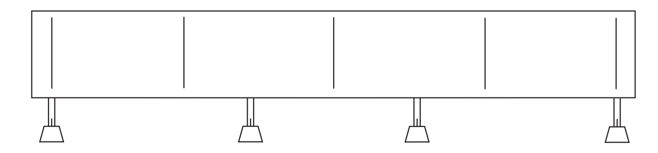


Рис. 9.4: Картонный прямоугольник шириной 10 см и длиной 1 м с несколькими тонкими полосками из тонкой бумаги.

Электризуйте этот прямоугольник, несколько раз соскоблив потертой пластиковой линейкой по верхнему краю картона. После удаления линейки, обратите внимание, что полосы на границах прямоугольника находятся выше, чем средние полосы, Рис. 9.5 (a). Этот факт свидетельствует о более высокой концентрации зарядов на границах прямоугольника, Рис. 9.5 (b).

[2] Эксперимент 6.9 из [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

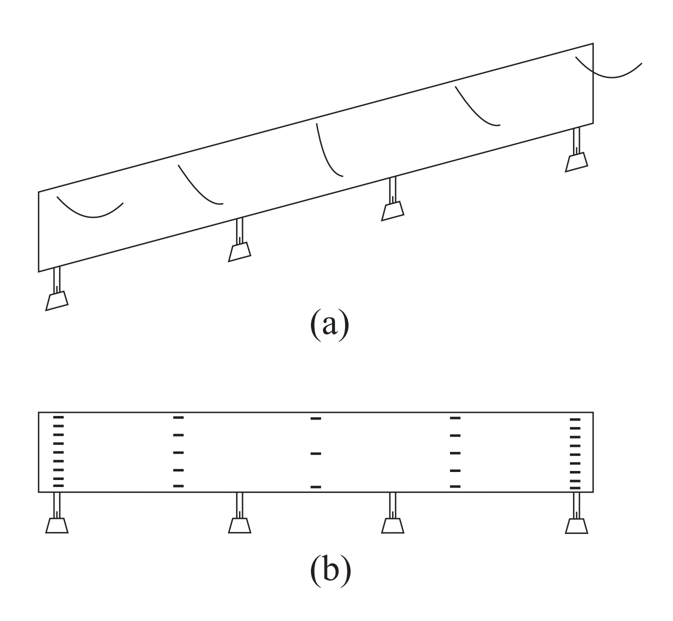


Рис. 9.5: (a) Полоски около границ поднимаются выше, чем те в середине прямоугольника. (b) Качественное распределение зарядов по поверхности прямоугольника.

9.2 Сбор и сравнение плотности поверхностного заряда

Эксперимент 9.3 - *Сбор поверхностных зарядов асимметричного электроскопа*

Вы можете непосредственно сравнить величины поверхностных плотностей заряда, расположенных в разных областях заряженного электроскопа, используя соответствующие коллекторы заряда. Примером является контрольная плоскость Кулона, представленная на Рис. 2.17 в разделе 2.6. Это может быть картонный диск диаметром 1 см с пластиковой соломкой длиной 4 см, соединенной в центре клеем или пластилином. Качественно оцените количество заряда, собранного контрольной плоскостью, сравнивая наименьшее расстояние, на которое требуется поднести ее, чтобы воздействовать на поднятые полоски двух других электроскопов, один из которых заряжен положительно, а другой – отрицательно. Эти два электроскопа должны быть отделены друг от друга, а также удалены от асимметричного изолированного и электризованного проводника. После сбора зарядов из разных областей этого асимметричного проводника, медленно поднесите контрольную плоскость близко к поднятым полосам электроскопов. Оцените критическое расстояние, на котором эти полосы начинают притягиваться или отталкиваться плоскостью Кулона. Чем больше эти критические расстояния, тем больше электризация контрольной плоскости.

В качестве асимметричного проводника используйте электроскоп из разделочной доски, показанный на Рис. 9.1 (a). Удалите его полоски папиросной бумаги, как на Рис. 9.6 (a).

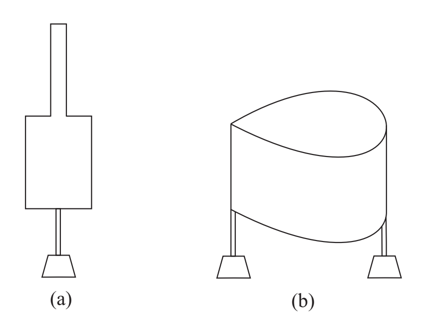


Рис. 9.6: Асимметричные проводники, изолированные от земли пластиковыми соломками.

Другим примером асимметричного проводника является бумажный прямоугольник шириной 10 см и длиной 60 см, поддерживаемый тремя или четырьмя пластиковыми соломками, закрепленными на соответствующих опорах. Приклейте или закрепите две границы этой гибкой полосы, чтобы придать ей форму капли, Figure 9.6 (b).

Электризуйте электроскоп из разделочной доски, соскабливая его картон потертой акриловой линейкой или соломкой. Сначала соберите заряды с рукоятки этого электроскопа, используя контрольную плоскость, как на Рис. 9.7 (a). Держите заряженную плоскость Кулона только через ее изолирующую соломку. Затем поднесите ее к положительно заряженному электроскопу. Измерьте критическое расстояние между заряженной контрольной плоскостью и этим электроскопом, которое требуется для воздействия на его поднятую полоску. Повторите эту процедуру, но теперь поднесите заряженную контрольную плоскость близко к отрицательно заряженному электроскопу.

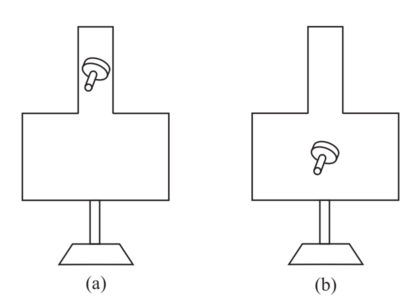


Рис. 9.7: (a) Сбор зарядов с рукоятки асимметричного проводника. (b) Сбор зарядов из центра доски.

Соберите теперь заряды из центра доски, как показано на Рис. 9.7 (b).

Поднесите заряженную контрольную плоскость близко к положительно и отрицательно заряженным электроскопам, измеряя еще раз критические расстояния, необходимые для воздействия на их поднятые полоски.

Сравните критические расстояния в первой ситуации (заряд, собранный с рукоятки электроскопа) и во второй ситуации (заряд, собранный из центра доски). Убедитесь, что критическое расстояние в первой ситуации больше, чем во второй. Этот факт указывает на то, что на рукоятке электроскопа плотность поверхностного заряда выше, чем на его доске, как показано на Рис. 9.3 (a).

Тот же вывод имеет место с асимметричным проводником в виде капли. Таким образом, количество зарядов, собранных с заостренной области капли, больше, чем количество, собранное с тупого участка, Рис. 9.8. Плотность поверхностного заряда больше в заостренной области капли, чем в ее тупой части.

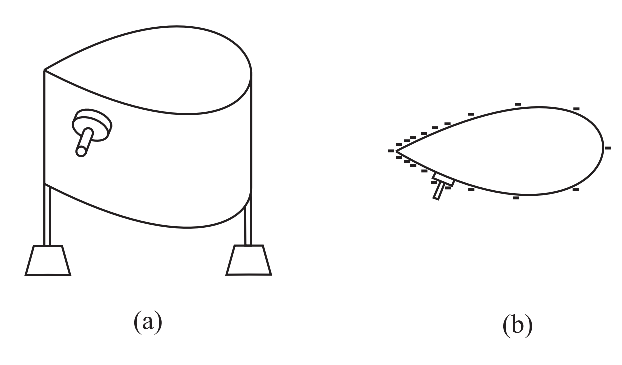


Рис. 9.8: (a) Контрольная плоскость на асимметричном проводнике. (b) Качественное распределение зарядов на этом проводнике.

Эксперимент 9.4 - *Сбор поверхностных зарядов длинной полоски бумаги*

Контрольная плоскость может также собрать заряды непосредственно с разных областей прямоугольника шириной 10 см и длиной от 1 до 2 м в эксперименте 9.2. Тонкие полоски папиросной бумаги этого прямоугольника препятствуют сбору зарядов. Чтобы избежать этой проблемы, удалите все полоски папиросной бумаги. Вы также можете удалить только половину полос, а именно те, которые расположены на правой стороне прямоугольника, где будет размещен коллектор. Сохраните полосы на левой стороне прямоугольника, чтобы увидеть, когда прямоугольник приобрел достаточно большое количество электризации. После сбора зарядов с любой области прямоугольника, подведите коллектор к положительно заряженному электроскопу и измерьте наименьшее необходимое расстояние для воздействия на полосу этого электроскопа. Эту процедуру также можно повторить с отрицательно заряженным электроскопом. Сравните эти критические расстояния для зарядов контрольных плоскостей, приходящих из разных областей прямоугольника. Сделайте вывод, что электризованные коллекторы,

с зарядами от границ прямоугольника, приобрели больший заряд, чем те, которые собирают заряды с центральных областей электризованного прямоугольника, Рис. 9.5 (b).

—————————————————————————————————

Иногда результаты этих экспериментов видны не очень ясно. Во-первых, плотности поверхностных зарядов различных областей одного и того же асимметричного проводника могут отличаться друг от друга незначительно. Кроме того, нелегко точно измерить критическое расстояние между заряженной контрольной плоскостью и электризованным электроскопом для притяжения или отталкивания ее поднятой полосы. Чтобы облегчить измерение этого расстояния, медленно перемещайте заряженный коллектор вперед и назад перед поднятой полоской заряженного электроскопа. Тогда вы можете легче наблюдать, когда происходит скоординированное движение вперед и назад поднятой полосы.

9.3 Грей и сила точек

Стивен Грей в 1731 году представил первое описание так называемой *силы острых точек*.[3] Он положил тонкие латунные листья в трех разных местах, а именно: на землю, на деревянный цилиндр диаметром 30 см и высотой 30 см, а также на вершину конической подставки высотой 30 см, с верхним диаметром 7,6 см и нижним диаметром 11,4 см. Он попытался привлечь эти медные листочки с помощью электризованной стеклянной трубки, поднося ее близко к листочкам. Когда эти листочки были положены на коническую подставку, он обнаружил, что притяжение происходило на гораздо большую высоту, чем при укладке листочков на стол, и по крайней мере в три раза выше, чем при укладке на пол комнаты. На Рис. 9.9 представлено качественное описание этого эксперимента.

Эксперимент 9.5 - *Воспроизведение эксперимента Грея*

Эксперимент Грея можно легко воспроизвести. Поднесите потертую акриловую линейку к кусочкам бумаги и измерьте критическое расстояние, на котором кусочки бумаги начинают притягиваться линейкой. В первой ситуации они лежат в центре листа бумаги формата A4. Во втором случае они лежат в центре бумажного цилиндра диаметром 4 см и высотой 10 см. В третьей ситуации они укладываются на верхнюю часть конуса высотой 10 см и диаметром основания 6 см. Отрежьте вершину конуса, заменив ее небольшим горизонтальным бумажным диском с диаметром около 0,5 см. Этот диск наклеен на конус. Теперь вы можете положить кусочки бумаги на эту плоскую вершину конуса и провести эксперимент. Конус и цилиндр должны быть сделаны из той же бумаги формата A4, что и плоский лист

[3] Раздел B.9 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

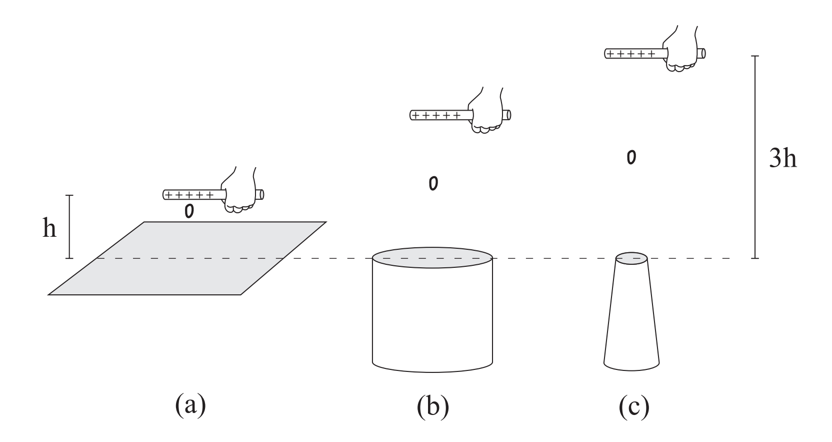


Рис. 9.9: (a) Легкий латунный листочек притягивается на высоту h от своего начального положения на полу. (b) Он поднимается выше, когда кладется на стол или на токопроводящий цилиндр диаметром 30 см. (c) Когда он находится на вершине конического проводника, он подтягивается на высоту в три раза выше, чем когда он находится на полу.

бумаги в первой ситуации. Лист бумаги в первой ситуации должен быть положен над тремя или четырьмя бумажными колоннами или над тремя или четырьмя бумажными цилиндрами. Чтобы начать эксперимент, этот лист бумаги, верхняя сторона цилиндра и верхняя часть конуса должны быть на одной высоте, то есть располагаться в одной горизонтальной плоскости. Эти три опоры должны быть отделены друг от друга.

Потрите акриловую линейку и медленно поместите ее над кусочками бумаги, которые лежат на плоском листе бумаги. Линейка должна находиться в горизонтальном положении. Обратите внимание, что они начинают двигаться к линейке, когда она находится примерно на 2 см выше листа бумаги. Когда бумажки лежат на цилиндре, они начинают двигаться, когда линейка находится на расстоянии 4 см от верхней стороны цилиндра. Когда кусочки бумаги расположены на конусе, они начинают двигаться на критическом расстоянии около 6 см между линейкой и вершиной конуса.

Эти расстояния являются только приблизительными. Они зависят от степени электризации линейки, от влажности воздуха, а также от формы, размера и веса кусочков бумаги. В любом случае, этот эксперимент ясно показывает, что движение кусочков бумаги происходит на бо́льших расстояниях, когда они укладываются на заостренные поверхности. С другой стороны, когда они лежат на плоском листе бумаги, натертая акриловая линейка должна быть приближена к ним гораздо ближе, чтобы вызвать движение кусочков бумаги. В этих трех ситуациях кусочки бумаги были положены на опоры, изготовленные из одного и того же материала, а именно, проводящего листа бумаги формата A4. Различные значения критических расстояний, необходимых для создания движения, можно объяснить

только различными формами этих опор.

Эксперимент 9.6 - *Электризованная линейка расположенная под листом, цилиндром и конусом из бумаги*

Три пластиковых листа (размером с лист бумаги формата A4) поддерживаются на 3-х или 4-х бумажных цилиндрах высотой 10 см. Листы должны быть на одной высоте над землей. Положите три опоры из эксперимента 9.5 (а именно, лист бумаги, бумажный цилиндр и бумажный конус) на эти три пластиковых листа, чтобы их основания были на одной высоте, Рис. 9.10.

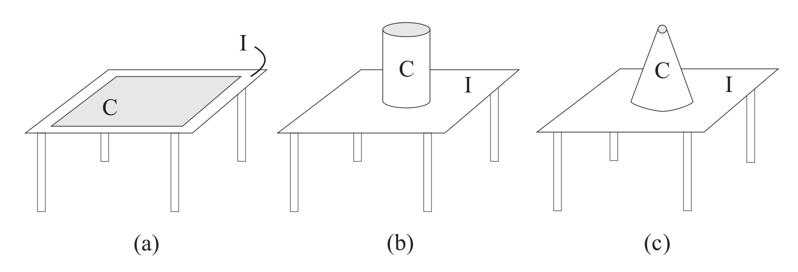


Рис. 9.10: (a) Проводящий лист бумаги C, уложенный на изолирующий лист из пластика I. (b) Проводящий цилиндр C на изоляционном листе I. (c) Проводящий конус C на изоляционном листе I.

Поместите кусочки бумаги в центре этих трех подставок. Потрите акриловую линейку и поместите ее ниже первого пластикового листа. Двигайте ее медленно вверх, всегда в горизонтальном положении. Кусочки бумаги не двигаются, даже когда натертая акриловая линейка очень близко подходит к пластиковому листу. Куски бумаги, расположенные на верхней стороне цилиндра, также не двигаются, когда к ним приближается потертая линейка, расположенная под цилиндром. С другой стороны, когда потертая линейка, расположенная под конусом, приближается к его основанию, кусочки бумаги, расположенные на ее кончике, сбрасываются с конуса. 9.11.

Эксперименты 9.5 и 9.6 можно объяснить, предполагая, что электризованные частицы накапливаются с более высокими плотностями поверхностных зарядов на кончиках проводников. Предположим, что натертая акриловая линейка отрицательно наэлектризована. Бумага ведет себя как проводник для электростатических экспериментов, а пластик – как изолятор. Рассмотрим бумажные куски, которые были сброшены с конуса в эксперименте 9.6. Конус поляризуется электризованной линейкой под ним, становясь положительным на его нижних частях и отрицательным на верхних участках, Рис. 9.12 (a).

Плотность поверхностных зарядов выше на вершине конуса, чем на его основании. Небольшой кусочек бумаги, расположенный на вершине конуса, становится отрицательно электризованным. Он отталкивается отрицательной линейкой, притягивается положительными зарядами на основании

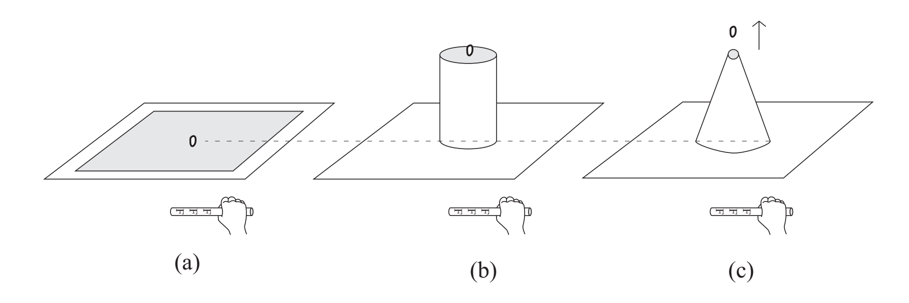


Рис. 9.11: (a) Электризованная линейка под листом бумаги. (b) под бумажным цилиндром. (в) под бумажным конусом. Кусочки бумаги не перемещаются в (a) и (b), но сбрасываются с конуса в положении (c).

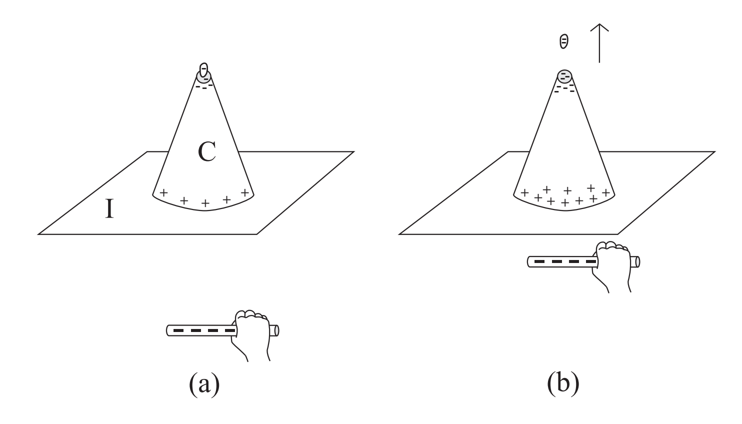


Рис. 9.12: (a) Проводящий конус C на изолирующей подложке I. Конус поляризован из-за наличия отрицательного тела под ним. На кончике плотность поверхностного заряда выше, чем на основании. (b) Когда линейка приближается к изолирующей опоре, кусочек бумаги сбрасывается с конуса.

конуса, а также отталкивается другими отрицательными зарядами, расположенными на вершине конуса. Суммарная электрическая сила, действующая на него, указывает вверх. Основной компонентой этой силы является отталкивающее действие, оказываемое другими соседними отрицательными зарядами, расположенными на вершине конуса. В ситуации, показанной на Рис. 9.12 (a), эта суммарная сила отталкивания меньше, чем вес куска бумаги, поэтому он не сбрасывается с конуса. Когда линейка приближается еще ближе к основанию конуса, величина его поляризации увеличивается. В основании больше положительных зарядов, на вершине больше отрицательных, а на каждом кусочке бумаги больше отрицательных зарядов. Следовательно, суммарная направленная вверх электрическая сила, действующая на кусок бумаги, также увеличивается. За пределами критического расстояния линейки суммарная электрическая сила отталкивания, действующая на бумажный кусок, будет больше его веса. Поэтому он сбрасывается

с конуса, Рис. 9.12 (b). Хотя отрицательный кусок бумаги отталкивается отрицательной линейкой, основная компонента силы, сбрасывающей его с конуса, возникает из-за отталкивания, создаваемого другими отрицательно электризованными частицами, расположенными на вершине конуса. Эти отрицательные заряды гораздо ближе к бумажному куску, чем отрицательная линейка.

Рассмотрим цилиндр на Рис. 9.11 (b). Даже когда линейка приблизилась к его основанию, бумажка не была сброшена. Причина такого поведения состоит в том, что плотность поверхностного заряда в верхней части цилиндра не была такой же высокой, как плотность поверхностного заряда в верхней части конуса на Рис. 9.11 (c), когда линейка был на том же расстоянии от его основания. Следовательно, сила отталкивания, действующая на отрицательно наэлектризованный кусочек бумаги, была недостаточно велика, чтобы преодолеть его вес.

Ситуация была иной для эксперимента 9.5. Теперь бумажный конус был заземлен через контакт с полом. Когда электризованная линейка приближается к нему, конус поляризуется. Поскольку он заземлен, часть его поляризованного заряда нейтрализована. Затем он приобретает суммарный заряд, противоположный знаку на линейке, Рис. 9.13 (a).

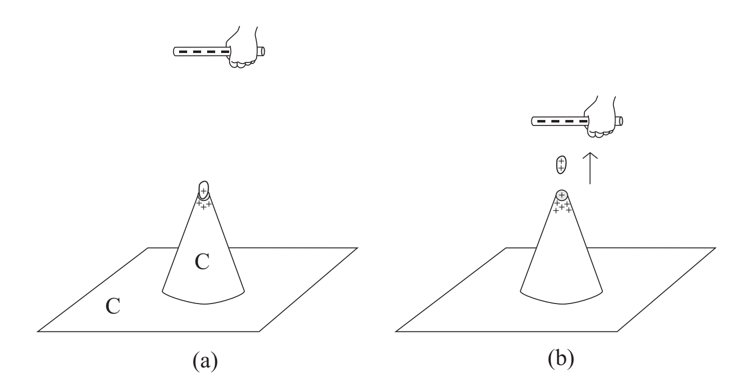


Рис. 9.13: (a) Проводящий конус C покоится на проводящей поверхности C, заземляя его. Положительный кусок бумаги притягивается отрицательной линейкой и отталкивается положительной вершиной заземленного конуса. (b) Когда линейка приближается к конусу, количество положительных зарядов на бумаге увеличивается, то же самое происходит с количеством положительных зарядов на вершине конуса. Кусок бумаги движется к линейке.

Эта электризация концентрируется в верхней части конуса и, следовательно, на кусочках бумаги, расположенных на кончике конуса. Кусок положительно электризованной бумаги затем подвергается действию двух сил, а именно силы притяжения со стороны отрицательной линейки, и силы отталкивания, создаваемой другими положительными частями вершины конуса. Эти две силы направлены вверх, а вес бумажного куска – вниз. Когда отрицательная линейка приближается к конусу, его кончик становится все более

и более положительным. То же самое происходит с бумажными кусками, расположенными на его вершине. Ниже определенного критического расстояния две восходящие силы преодолевают нисходящий вес куска бумаги. Тогда он движется к линейке, Рис. 9.13 (b).

9.4 Усиление янтарного эффекта

Самым ранним экспериментом по электростатике является так называемый эффект янтаря, аналогичный эксперименту 1.1. Есть несколько процедур, которые могут увеличить его интенсивность. Эти процедуры выведены из того, что было изложено в томе 1 этой книги и в предыдущих экспериментах этого тома. Мы приводим здесь некоторые из этих процедур, которые могут сделать этот эффект более зримым, увеличивая дальность или интенсивность его действия, а именно:

- Проводить эксперимент в холодную и сухую погоду.

- Материал, который будет потираться другим материалом для привлечения легких тел, должен быть изолятором. Тогда он не будет разряжаться во время контакта с руками. Если этот материал является проводником, он должен быть изолирован, чтобы избежать потери приобретенного заряда в результате заземления руками. Например, он может быть снабжен изолированной ручкой. Тогда материал нужно держать только за эту ручку, избегая прямого контакта материала с руками.

- Испытайте несколько разных изоляционных материалов. Втирайте в волосы, например, пластиковую соломку, акриловую линейку, трубку из ПВХ, пластину из пенопласта и т. д. Определите, какое тело после втирания привлечет большее количество кусочков бумаги.

- Испытайте различные вещества для натирания каждого из этих тел. Потрите трубку из ПВХ, например, в волосах, в бумажной салфетке, в пластиковом пакете, в хлопчатобумажной ткани и т. д. Определите вещество, которое ведет к большей электризации тела.

- Максимально увеличьте плотность поверхностного заряда материала, который будет подвергаться трению. Для этого потирание в волосах или листом бумаги нужно производить быстрыми движениями. Чем быстрее мы натираем, тем больше будет величина плотности приобретенного им поверхностного заряда.[4]

- Привлекаемые легкие тела должны, предпочтительно, вести себя как проводники. Примерами проводящих тел для электростатических экспериментов являются кусочки бумаги, небольшие кусочки алюминиевой фольги, хлопчатобумажная нить и т. д. Рассмотрим электризован-

[4] [SGS31] и [Hei99, стр. 451, примечание 6].

ную пластиковую линейку, притягивающую два легких тела одинакового веса, формы и размера, а именно, проводник и изолятор. Сила, оказываемая линейкой на проводник, намного больше, чем сила, оказываемая линейкой на изолятор, предполагая, что они оба находятся на одинаковом расстоянии от линейки. Это более сильное притяжение можно наблюдать, заметив, что проводник ускоряется больше, чем изолятор, когда оба они выпущены в состоянии покоя. Кроме того, электризованный пластик должен быть расположен ближе к изолятору, чем к проводнику, чтобы каждый из них начал двигаться к натертому пластику.

- Тела, которые будут притягиваться натертым пластиком, должны предпочтительно располагаться на проводящей поверхности. В конце концов, маленькие кусочки бумаги притягиваются с большей силой, когда они находятся над проводником, чем когда они находятся над изолятором.

- Легкие тела должны изначально располагаться на остроконечной опоре. Небольшой лист бумаги притягивается с большей силой, когда он находится над заостренной опорой, чем когда он находится над гладкой опорой.

Глава 10

Электрическое равновесие и прибор, который служит индикатором разности потенциалов

10.1 Проводник в электрическом равновесии

Тела в природе можно разделить или классифицировать на две основные группы – проводники и изоляторы. Основное различие между этими телами состоит в том, что в проводниках имеются подвижные наэлектризованные частицы, которые могут перемещаться внутри проводника и вдоль его поверхности. Изоляторы, с другой стороны, не имеют свободных наэлектризованных частиц, которые могут перемещаться по всему объему материала. Их подвижные частицы могут двигаться только внутри молекул, составляющих изолятор. Поэтому изоляторы не позволяют проходить или течь наэлектризованным частицам через их тела или вдоль их поверхностей. Мы еще раз напоминаем читателю, что проводящее или изолирующее поведение любого тела зависит не только от его природы или химического состава, но также и от разности потенциалов, которая приложена к его концам.

Рассмотрим проводник C в состоянии покоя относительно земли. Он может быть электрически изолирован от земли или от других проводников. Альтернативно, он может быть соединен проводящими телами с землей или с другими проводниками. Проводник может иметь положительный, отрицательный или нулевой суммарный заряд. Он может быть в удалении от других тел, или может находиться под действием соседних электризованных тел (он может быть, например, поляризован близко лежащим заряженным телом). В этом разделе дается определение электрического равновесия для

этого проводника, верное для всех последующих ситуаций:

Определение 10.1

Рассмотрим электризованный проводник в состоянии покоя относительно земли, подверженный электрическому воздействию со стороны других тел, или же полностью изолированный. Когда распределение его заряда остается постоянным во времени, говорят, что электричество на нем находится *в равновесии*, а проводник находится в *электрическом равновесии*. С другой стороны, когда распределение заряда изменяется во времени, говорят, что электричество на нем находится *в неравновесном состоянии*, а проводник находится *в электрически неравновесном состоянии*, или говорят, что проводник *электрически не сбалансирован*.

Уильям Томсон (1824-1907), известный также как лорд Кельвин, представил подобное определение в 1848 году:[1]

> *Электрическое равновесие.*
>
> 66. Когда тело, находящееся в состоянии покоя, наэлектризовано, и когда, будучи подвержено электрическому воздействию со стороны других тел или будучи полностью изолировано, распределение его заряда остается неизменным, говорят, что электричество на нем находится в равновесии.

О плотности поверхностного заряда в каждой точке проводника можно судить по поведению полоски тонкой бумаги, приклеенной в этой точке. Чем больше отклоняется полоска, тем больше плотность поверхностного заряда. Когда углы наклона относительно вертикали всех соединенных с телом полосок остаются постоянными во времени, мы говорим, что оно находится в электрическом равновесии. Когда, с другой стороны, наклон любой из полос изменяется со временем, мы говорим, что проводник не находится в электрическом равновесии или что он не сбалансирован. Примеры электрически неравновесного состояния:

- Когда проводник заряжается. Рассмотрим, например, первоначально разряженный электроскоп. Он находится в электрически неравновесном состоянии, когда электризованная пластмассовая линейка царапает по краю картона, и его полоска из папиросной бумаги поднимается.

- Когда проводник разряжается. Рассмотрим, например, изначально заряженный электроскоп. Прикоснитесь к его картону пальцем. Электроскоп разряжается из-за заземления. Он электрически неуравновешен, когда его полоска падает.

[1] [Tho84d, стр. 46, §66].

- Рассмотрим проводник, изолированный от земли. Проводник поляризован присутствием соседнего электризованного тела. Степень или величина этой поляризации изменяется во времени, когда наэлектризованное тело приближается или удаляется от проводника. Проводник находится в неравновесном состоянии во время этих перемещений находящегося рядом электризованного тела.

- Когда два электроскопа соединены плохим или несовершенным проводником, как в экспериментах раздела 3.3. Рассмотрим, например, два первоначально разряженных электроскопа, соединенных несовершенным проводящим проводом. Когда по краю картона одного электроскопа проводят натертым пластиком, его полоска поднимается практически сразу, а полоса другого проводника поднимается медленно.

- Рассмотрим электроскоп, первоначально наэлектризованный и изолированный от другого электроскопа, изначально разряженного. Соедините их картоны плохо проводящим материалом. Оба электроскопа будут разбалансированы, когда полоса первого электроскопа падает, а полоса второго электроскопа поднимается.

10.2 Электрический потенциал проводника

Температура – это величина, которая характеризует равновесие в теплофизике. Прибор, который измеряет температуру, называется термометром. Что касается статики газов и жидкостей, величина, характеризующая механическое равновесие, называется давлением. Атмосферное давление измеряется барометром, а манометр измеряет давление в целом.

Что касается электростатики, то величина, характеризующая равновесие, называется *электрическим потенциалом* или *электростатическим потенциалом*. Он будет представлен греческой буквой ϕ. Теперь мы можем дать другое определение:

Определение 10.2

Все точки внутри и вдоль поверхности однородного проводника в электрическом равновесии находятся под одинаковым электрическим потенциалом ϕ. Более того, этот электрический потенциал постоянен во времени для проводника в равновесии.

Здесь мы даем некоторую краткую информацию, связанную с потенциалом.[2] Концепция электрического потенциала была введена Кавендишем (1731-1810) в 1771 году, хотя он не пользовался термином "потенциал".

[2] [Tho84b, стр. 367], [Max54a, статья 16, с. 15], [Whi73a, стр. 54-55 и 61], [Roc89], [Ass92a, стр. 18], [Hei99, стр. 449 и 498-500] и [Ass15a, стр. 22].

Функция потенциала была введена как математическое понятие в учении о гравитации Лагранжем (1736-1813) в 1777 году. Лаплас (1749-1827) получил в 1782 году уравнение, которому должна удовлетворять эта потенциальная функция в пустом пространстве, опубликовав свои результаты в 1785 году. Пуассон (1781-1840) ввел потенциальную функцию в теорию электромагнетизма в 1811 году. В 1813 году он обобщил уравнение Лапласа, получив уравнение, которое было справедливо также для областей, содержащих вещество и свободные заряды. Термин «потенциал» был введен Грином (1793-1841) в 1828 году.

В этой книге анализируется прибор, который может указывать на равенство или неравенство потенциалов между двумя проводниками. Здесь обсуждаются также практические аспекты, связанные с работой этого инструмента. Но мы не будет рассматривать математические свойства потенциальной функции.

10.3 Электроскоп с проводящим корпусом

В этом разделе представлен инструмент, который указывает, когда два проводника имеют одинаковый электростатический потенциал или когда они имеют разные потенциалы.[3] Когда это устройство надлежащим образом откалибровано, оно также позволяет измерять эту разность потенциалов.

Предположим, что два проводника C_1 и C_2 изолированы друг от друга и от земли. Кроме того, предположим, что каждый проводник находится в электрическом равновесии при потенциалах ϕ_1 и ϕ_2 соответственно. Какой инструмент может указать, что $\phi_1 = \phi_2$ или что $\phi_1 \neq \phi_2$? Электроскоп, использованный в томе 1 этой книги и представленный в разделе 2.2, Рис. 2.2 и 2.3, указывает на поверхностную плотность заряда. Он не указывает на электрический потенциал. Чем больше плотность поверхностного заряда в месте расположения тонкой полоски папиросной бумаги, тем выше поднимется полоска относительно картона. Висящая вертикально полоска указывает на нулевую или очень низкую плотность поверхностного заряда.

В главе 7 проанализировано распределение зарядов на внутренней и внешней стенках полого проводника. Это был косвенный анализ с помощью полосок тонкой бумаги. Чем выше отклонение полосы, тем больше плотность поверхностного заряда на данном участке. В главе 7 представлен также прямой анализ поверхностной плотности заряда. Мы собрали часть электричества, расположенного на внутренней и внешней стенках проводника. Для этого использовались коллекторы заряда или штампы Кулона.

Например, в случае эксперимента 7.1, Рис. 7.1, заряды распределяются только на внешней стенке электризованной цилиндрической оболочки. На внутренней стенке не было зарядов. Этот наэлектризованный проводник из бумаги или картона находился в равновесии. Их внутренние и внешние стены находились в электрическом контакте через саму бумагу. Несмотря на существование этого проводящего материала, соединяющего внутренние

[3] [Tho84a], [Tho84c], [Per44] и [TP11].

и внешние стенки, на внутренней стенке не было плотности поверхностного заряда, тогда как внешняя стенка имела плотность заряда, отличную от нуля. Какой инструмент может указывать на то, что внутренние и внешние стены имеют одинаковый потенциал?

Этот важный инструмент состоит из двух проводящих частей, A и B, электрически изолированных друг от друга, Рис. 10.1.

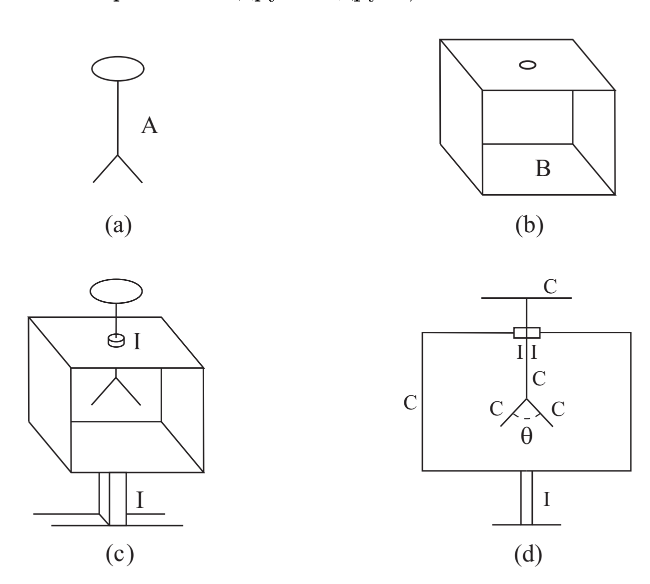


Рис. 10.1: Электроскоп с токопроводящим корпусом. (a) Проводящая часть A. (b) Проводящая часть B. (в) Вид спереди. Между частями A и B имеется изолятор I. Есть еще один изолятор I между частью B и землей. (d) Вид инструмента сбоку. Буквами C обозначены проводники, буквами I – изоляторы, а буквой θ обозначен угол раскрытия между подвижными листьями.

Этот инструмент будет называться здесь *электроскопом с проводящим корпусом*. Рис. 10.1 иллюстрирует конкретную модель этого инструмента. Часть A инструмента представлена на Рис. 10.1 (a). Она имеет горизонтальный диск, вертикальный стержень или ось вместе с двумя подвижными створками, которые могут открываться. Часть B инструмента представлена на Рис. 10.1 (b). Это токопроводящий корпус с отверстием в верхней крышке. Детали A и B изготавливаются только из токопроводящих материалов. Рис. 10.1 (c) представляет собой встроенный инструмент. Он содержит изолятор I, который соединяет часть A с частью B, сохраняя их электрическую изоляцию. Есть еще один изолятор I, который изолирует электрическую часть B от земли. Рис. 10.1 (d) иллюстрирует прибор в профиль. Буквами C обозначены проводники, буквами I – изоляторы, а буквой θ – угол раскрытия листьев электроскопа.

Эксперименты из глав 7 и 8 представляют принципы, обосновывающие рабочий механизм этого устройства. Это подходящий инструмент для опре-

деления разности потенциалов между его частями A и B.

Рис. 10.2 иллюстрирует электроскоп с токопроводящим корпусом, построенный из простых электроскопов, показанных на рисунках 2.2 и 2.3. Конверт представляет собой проводящую цилиндрическую полоску из бумаги или картона, закрепленную на изолирующей соломке. Изолятором между частями A и B этого электроскопа является просто воздух. Обе части изолированы от земли пластиковыми соломками.

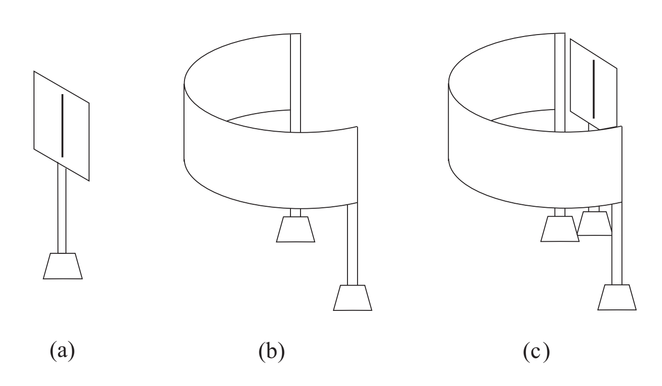


Рис. 10.2: Электроскоп с токопроводящим корпусом. (a) Часть A представляет собой простой электроскоп, сделанный из полоски папиросной бумаги, наклеенной на картон. Он поддерживается пластиковой соломкой. (b) Часть B представляет собой открытую цилиндрическую оболочку из бумаги или картона. Она поддерживается пластиковыми соломками. (в) Собранный электроскоп.

Рис. 10.3 представляет другой электроскоп с токопроводящим корпусом, построенным с использованием простого электроскопа, Рис. 2.2 и 2.3. Конверт теперь представляет собой обувную коробку из токопроводящего картона. Две стороны коробки и половина третьей были вырезаны. Часть A изолирована от части B воздухом. Часть A изолирована от земли пластиковой соломкой, а часть B изолирована пластиной из пенопласта.

Рис. 10.4 иллюстрирует другой электроскоп с проводящим корпусом. Буква C обозначает проводники, I – изоляторы, а θ – угол раскрытия.

На Рисунке 10.5 (a) и (b) представлен классический электроскоп с проводящим корпусом. У него два подвижных листа или полоски. Рис. 10.5 (c) и (d) иллюстрирует электроскоп с проводящим корпусом, который имеет одну подвижную полосу. Проводники представлены буквами C, изоляторы – буквами I, а угол раскрытия – буквой θ.

Изолятором между частями A и B может служить воздух, кусок пенопласта, пластик или ПВХ. В некоторых учебниках упоминаются винные пробки, соединяющие части A и B. Это плохой выбор, ведь пробка ведет себя как проводник в электростатике, как обсуждалось в разделе 3.1. Любое вещество, соединяющее части этого электроскопа A и B, должно быть проверено заранее. Следует использовать только изоляторы. Например, многие виды резины ведут себя как проводники и не должны использоваться в ка-

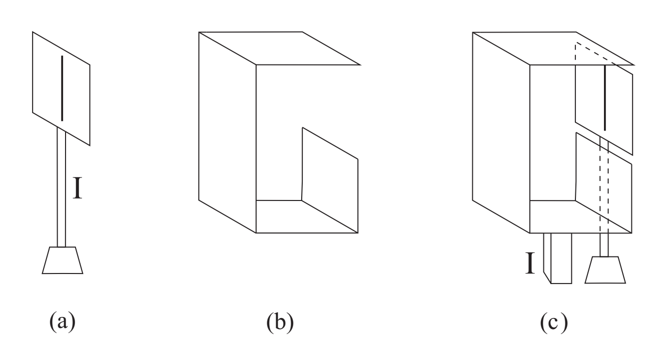


Рис. 10.3: Еще один пример электроскопа с проводящим корпусом. (a) Часть A представляет собой простой электроскоп с полоской папиросной бумаги, наклеенной на картон. Он поддерживается пластиковой соломкой I. (b) Часть B – обувная коробка без двух сторон и половины третьей. (в) Установленный электроскоп, поддерживаемый изолирующей пластиной I.

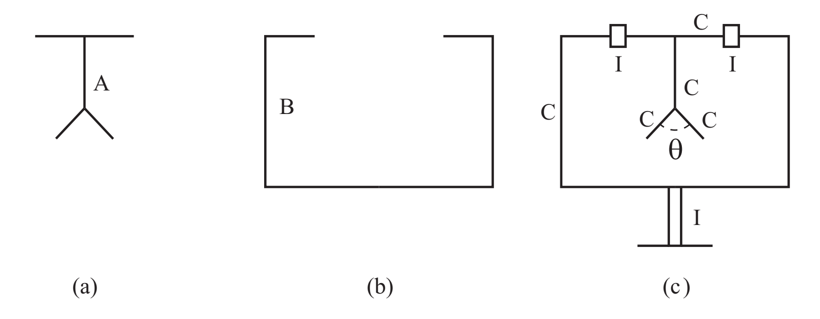


Рис. 10.4: Электроскоп с проводящим корпусом, вид в профиль (a) Проводящая часть A. (b) Проводящая часть B. (в) Установленный инструмент. Проводники представлены буквами C, изоляторы – буквами I, а угол раскрытия – θ.

честве изолятора в этом устройстве.

Во многих коммерческих или учебных электроскопах проводящие части выполнены из металла. В этой книге инструмент будет сделан из бумажной, картонной и папиросной бумаги.

В точном инструменте часть B должна охватывать или покрывать часть A почти полностью. Однако для того, чтобы увидеть угол открытия, должно быть отверстие в части B. В идеале размер этого отверстия должен быть небольшим, чтобы он не влиял на разность потенциалов, указанную прибором. В этой книге мы будем использовать это устройство только в качестве качественного индикатора разности потенциалов, не заботясь о количественных измерениях. Поэтому электроскопы могут иметь большие отверстия в части B.

Обычно есть два проводящих электрода, соединенных с частями A и

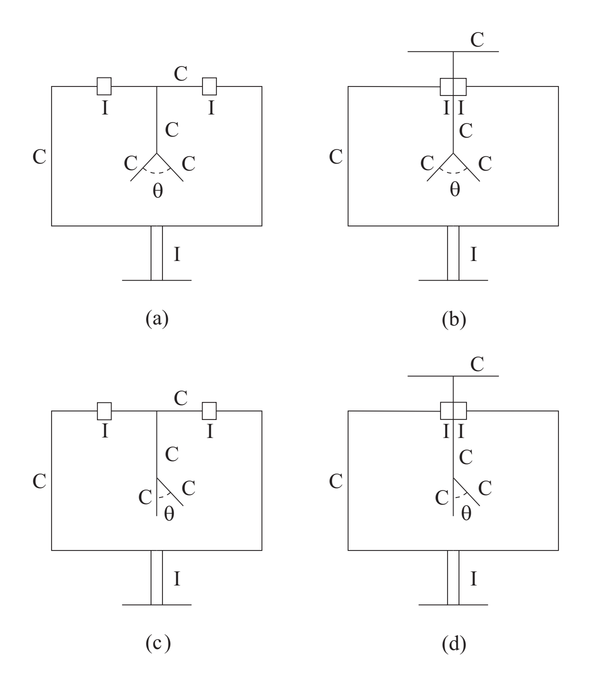


Рис. 10.5: Электроскоп с проводящими корпусами. (a) и (b): Электроскоп с двумя подвижными листьями. (c) и (d): Электроскоп с одной подвижной полосой, которая может отклоняться от фиксированной части.

B любого электроскопа с проводящим корпусом. Так называемый главный электрод, PE, соединяет часть A с определенным проводником C_1, тогда как так называемый вторичный электрод, SE, соединяет часть B с другим проводником C_2. 10.6.

В этом примере угол раскрытия θ части A будет указывать на разность потенциалов между проводниками C_1 и C_2. Когда $\theta = 0$, проводники C_1 и C_2 будут иметь одинаковый потенциал. Когда $\theta \neq 0$, проводники C_1 и C_2 будут иметь разные потенциалы. Чем больше значение θ, тем больше будет их разность потенциалов. В идеале части A и B электроскопа должны иметь небольшие площади по сравнению с областями проводников C_1 и C_2. В этом случае они не будут существенно влиять на потенциалы, которые мы хотим измерить.

Эти два электрода также могут быть подключены к разным частям одного проводника, чтобы проверить, что все точки этого проводника имеют одинаковый потенциал.

Во многих ситуациях проводником C_2 будет сама Земля, так что проводящий корпус электроскопа будет заземлен. В этом случае угол раскрытия будет указывать на разницу потенциалов между проводником C_1 и землей. Потенциал Земли обычно берется как ноль. Часть B может быть заземлена вторичным электродом, как показано на Рис. 10.7 (a). Когда часть B

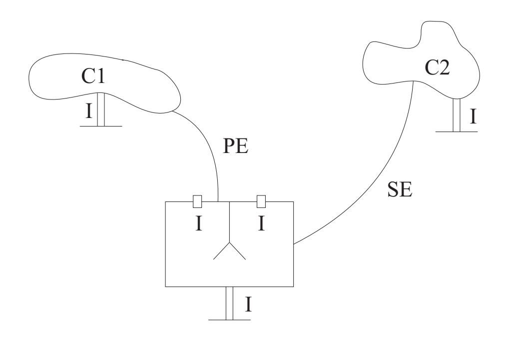


Рис. 10.6: Основной электрод PE соединяет часть A электроскопа с проводником C_1, а вторичный электрод SE соединяет часть B с проводником C_2.

поддерживается на проводящей пластине, соединенной с Землей, она будет автоматически заземлена. Вторичный электрод больше не нужен, как показано на Рис. 10.7 (b).

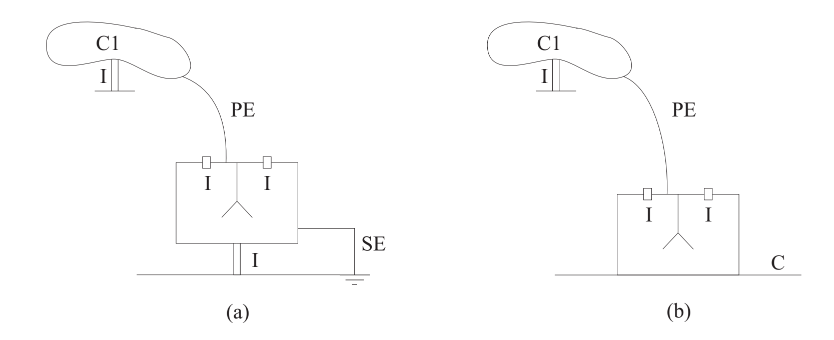


Рис. 10.7: Электроскоп с заземленным корпусом. (a) Вторичный электрод подключен к Земле. (b) Корпус на проводящей пластине C, соединенной с землей.

Обычно электроды, соединяющие электроскоп с проводниками C_1 и C_2, представляют собой металлические провода. Нам нужно манипулировать ими, чтобы задействовать эти связи. Для этого электроды должны быть изолированы от земли, чтобы избежать разряда проводников. Изоляция обычных многожильных медных проводов, продаваемых в магазинах электрооборудования, обычно изготавливается из полиэтилена или ПВХ. Они ведут себя как хорошие изоляторы при разности потенциалов примерно до 300 В. В электростатических экспериментах, с другой стороны, мы имеем дело с напряжениями, достигающими 1000 В или 10000 В. Эти гибкие пластмассы вокруг медных проводов не являются хорошими изоляторами для электростатических экспериментов. Поэтому при использовании этих изолированных проводов в качестве электродов, не прикасайтесь к ним непосредственно руками. Будьте осторожны при манипулировании этими электродами. В идеале закрепите часть этих проводов с помощью акрило-

вой линейки или трубки из ПВХ. Например, намотайте часть провода на пластиковую линейку, как показано на Рис. 10.8 (a). Рука будет касаться только линейки или трубки из ПВХ, но не провода. Соедините таким способом часть A электроскопа с проводником C_1, не разряжая этот проводник.

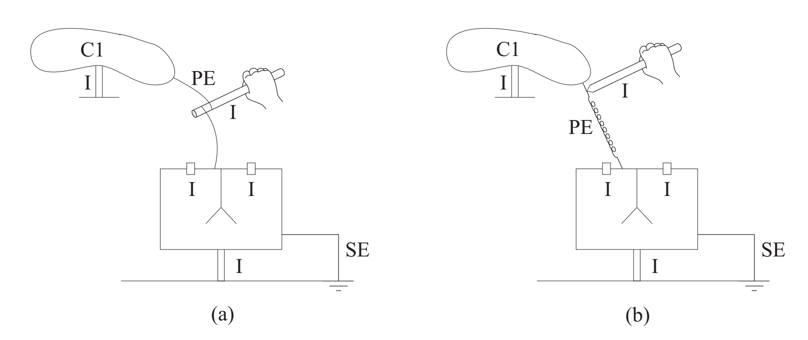


Рис. 10.8: Электроскоп с заземленным корпусом и основным электродом, соединенным с изоляционной трубкой. (a) Проводящий провод, обмотанный вокруг трубки. (b) Проводящая пружина, соединенная с трубкой.

Вы также можете манипулировать этими электродами, используя другую процедуру. Для этого используйте проводящие спиральные провода, такие как пружины, которые могут быть сжаты или растянуты. Прикрепите конец этого провода к акриловой линейке или трубке из ПВХ,[4] как показано на Рис. 10.8 (b).

Чтобы преобразовать этот электроскоп в электрометр, необходимо его откалибровать, чтобы каждый угол раскрытия соответствовал известной разности потенциалов. В этой книге мы не будем заниматься этой проблемой. Электроскоп будет использоваться только для того, чтобы узнать, находятся ли две точки под одинаковым или разными потенциалами. Он также будет качественно указывать величину разности потенциалов в зависимости от размера угла раскрытия. Большой угол указывает на большую разность потенциалов, в то время как маленький угол указывает на небольшую разность потенциалов.

10.4 Эксперименты с использованием электроскопа в проводящем корпусе

10.4.1 Электроскоп показывает, что все части находящегося в равновесии проводника имеют одинаковый потенциал

В этом подразделе описаны некоторые эксперименты, связанные с равенством потенциалов между различными частями изолированного и электри-

[4] [Per44, Рис. 1277, стр. 1421].

зованного проводника в равновесии. В проведенных нами экспериментах использовался простой электроскоп, окруженный цилиндрической проводящей оболочкой, как на Рис. 10.2, или простой электроскоп, окруженный проводящей коробкой для обуви, как на Рис. 10.3. Разница потенциалов качественно определялась углом раскрытия между полоской папиросной бумаги и картоном электроскопа. Однако изображения экспериментов этого раздела были сделаны с помощью электроскопа, показанного на Рис. 10.6. Этот последний электроскоп имеет два подвижных листа, в то время как у используемого нами была одна подвижная полоса. В любом случае, проще и поучительнее представить результаты экспериментов с электроскопом, изображенным на Рис. 10.6, чем на Рис. 10.3.

Сначала мы выполним некоторые эксперименты, показывающие, что этот инструмент указывает на то, что любые две точки находящегося в равновесии электризованного проводника действительно имеют один и тот же потенциал. Позже мы покажем некоторые экспериментальные условия, которые делают потенциал части A электроскопа отличным от потенциала части B.

Эксперимент 10.1 - *Касание внутренней и внешней стенок электризованной цилиндрической оболочки*

Начните с наэлектризованной цилиндрической оболочки, подобной изображенной на Рис. 7.1 (b). Избыточные заряды распределяются только на внешней поверхности цилиндра, как указывают на то поднятые полоски папиросной бумаги. В этом можно убедиться также с помощью контрольной плоскости, касаясь ею внутреннюю и внешнюю поверхности. Затем вы можете проверить заряд, полученный этим коллектором. Предположим в настоящем эксперименте, что на внутренней стенке цилиндрической оболочки нет полосок, а на ее наружной стенке есть одна полоска. Когда оболочка наэлектризована, эта полоска поднимается. Подсоедините основной электрод электроскопа на Рис. 10.6 к внутренней стенке электризованного цилиндра, в то время как вторичный электрод подключен к внешней стенке. Полоски папиросной бумаги части A электроскопа остаются внизу, с $\theta = 0$. Поэтому внутренняя и внешняя стенки электризованной цилиндрической оболочки имеют одинаковый потенциал, Рис. 10.9.

Этот факт также может быть продемонстрирован с помощью заземленного электроскопа, Рис. 10.7. Для этого соедините главный проводник с внутренней стенкой электризованного цилиндра и наблюдайте угол раскрытия θ_1 полосок на участке A, Рис. 10.10 (a). Затем соедините главный электрод с внешней стенкой электризованного цилиндра и наблюдайте угол раскрытия θ_2 полосок в точке A, Рис. 10.10 (b). После проведения этого эксперимента видно, что $\theta_1 = \theta_2 \equiv \theta$.[5] Поэтому внутренние и внешние стенки электризованного цилиндра имеют один и тот же потенциал относительно земли. Между внутренней и внешней стенами нет разницы потенциалов, то есть $\theta_1 - \theta_2 = 0$. Они тогда находятся в электрическом равновесии.

[5]Символ “$\equiv$” означает равно по определению.

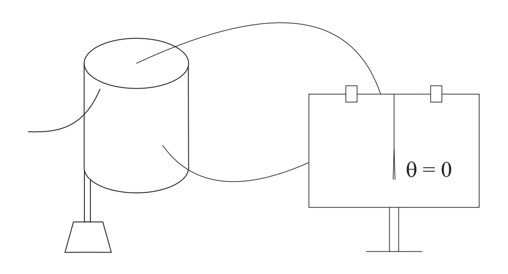


Рис. 10.9: Часть A электроскопа соединена с внутренней стенкой электризованной цилиндрической оболочки, а часть B соединена с внешней стенкой. Угол раскрытия электроскопа равен нулю, что указывает на то, что эти две стенки имеют одинаковый потенциал.

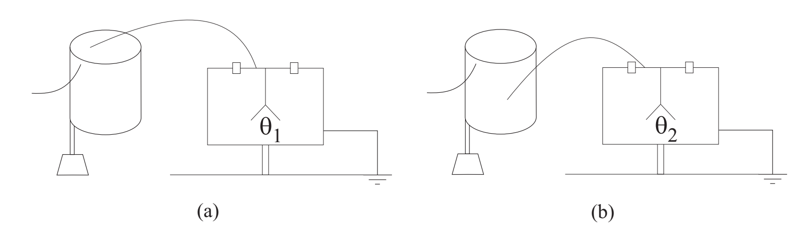


Рис. 10.10: (a) Заземленный электроскоп с частью A, соединенной с внутренней стенкой наэлектризованной цилиндрической оболочки. Угол раскрытия θ_1. (b) Та же конфигурация с частью A, подключенной к внешней стенке. Угол раскрытия θ_2. Раскрытие электроскопа в обеих ситуациях одинаковое, то есть $\theta_1 = \theta_2$.

В этом можно убедиться по-другому. Для этого поменяйте заземленный электрод. Заземлите участок A через главный электрод. Вторичный электрод сначала соединяется с внутренней стенкой электризованной цилиндрической оболочки. Обратите внимание на угол раскрытия θ_1, Рис. 10.11 (a). Вторичный электрод затем подключается к внешней стенке оболочки. Обратите внимание на угол раскрытия θ_2, Рис. 10.11 (b). Сравнивая эти два угла, мы приходим к выводу, что в обеих ситуациях один и тот же угол раскрытия, а именно $\theta_1 = \theta_2 = \theta$. Поэтому внутренние и внешние стены находятся в равновесии при одном и том же потенциале, потому что мы находим, что $\theta_1 - \theta_2 = 0$.

Конфигурация рисунка 10.11 очень интересна. Она показывает угол раскрытия $\theta \neq 0$ для подвижных полосок участка A, даже когда участок A заземлен, при условии, что точка B имеет потенциал, отличный от потенциала в точке A. Хотя заземленная часть A имеет нулевой потенциал, участок B электроскопа соединен с наэлектризованной цилиндрической оболочкой с потенциалом, отличным от нуля.

Эксперимент 10.2 - *Касание асимметричного проводника в разных точках*

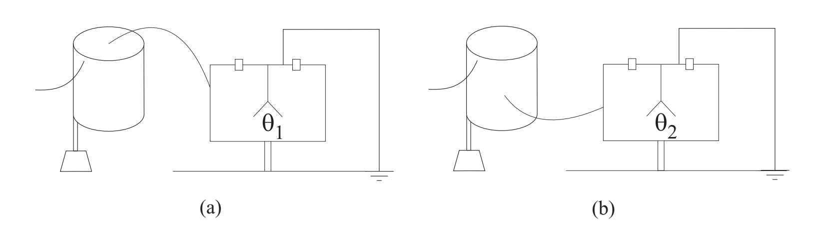


Рис. 10.11: (a) Электроскоп заземлен в точке A, а B соединена с внутренней стенкой электризованной цилиндрической оболочки. Угол раскрытия θ_1. (b) Та же конфигурация с точкой B, подключенной к внешней стенке. Угол раскрытия θ_2. В обоих случаях угол раскрытия одинаков, то есть $\theta_1 = \theta_2$.

В другом эксперименте такого типа используется асимметричная полоса проводника, подобная каплеобразному проводнику на Рис. 9.6 (b). Когда этот проводник наэлектризован, существует градиент поверхностной плотности заряда вдоль его поверхности — больше в заостренных областях и меньше в тупых областях, как показывает контрольная плоскость, Рис. 9.8. Приклейте верхний конец полоски папиросной бумаги на внешней стенке этого проводника, чтобы было видно, когда он наэлектризован. После зарядки эта полоска поднимается. Подключите главный электрод заземленного электроскопа в любой точке внешней стенки проводника, соблюдая всегда одинаковый угол раскрытия θ. Плотности поверхностного заряда σ различны в точках 1, 2 или 3, а именно: $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$. Несмотря на это, во всех этих точках угол раскрытия один и тот же, а именно: $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 \equiv \theta$, Рис. 10.12.

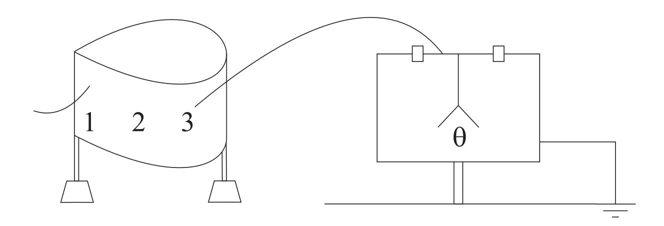


Рис. 10.12: Заземленный электроскоп, показывающий одинаковый угол раскрытия θ, независимо от того, подключен основной электрод к точке 1, 2 или точке 3 электризованного капельного проводника.

Эксперимент 10.3 - *Касание длинной наэлектризованной полосы в разных точках*

Проведите аналогичный тест, используя наэлектризованный прямоугольник из экспериментов 9.2 и 9.4, Рис. 9.4. Сначала прямоугольник должен быть сильно наэлектризован, с заметно поднятыми полосками папиросной бумаги. На краях прямоугольника плотность поверхностного заряда выше,

чем в его центральной области, Рис. 9.5. Подсоедините главный электрод заземленного электроскопа к любой точке прямоугольника. Обратите внимание, что угол раскрытия θ электроскопа всегда один и тот же, независимо от места подключения электрода. Этот факт указывает на то, что все эти точки имеют одинаковый электрический потенциал. Существует градиент поверхностной плотности заряда, с большими значениями на границах прямоугольника и меньшими в его центральных областях. Но электрический потенциал одинаков во всех точках, Рис. 10.13.

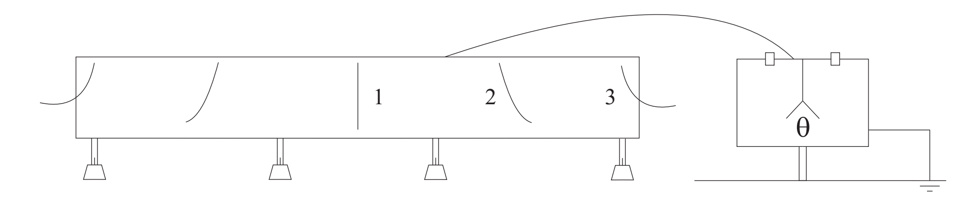


Рис. 10.13: Заземленный электроскоп показывает всегда один и тот же угол раскрытия θ, независимо от того, касается его электрод точек 1, 2 или точки 3 наэлектризованного прямоугольника.

Эту процедуру можно провести в обратном порядке. Заземлите участок A электроскопа и подключите вторичный электрод к точкам 1, 2 или 3 наэлектризованного прямоугольника. Угол раскрытия θ всегда будет один и тот же, независимо от места подключения вторичного электрода, Рис. 10.14 (a).

Изолируйте этот электроскоп от земли. Соедините часть A с определенной точкой наэлектризованного прямоугольника, в то время как часть B соединена с любой другой точкой прямоугольника. Обратите внимание, что листья электроскопа не раскрываются, $\theta = 0$, Рис. 10.14 (b). Этот факт указывает на то, что все точки наэлектризованного прямоугольника имеют одинаковый потенциал. Несмотря на этот факт, плотность поверхностного заряда в разных точках прямоугольника разная, на что указывают поднявшиеся полосы или коллекторы зарядов из разных областей прямоугольника с использованием контрольной плоскости.

10.4.2 Процедуры, которые могут изменить потенциал одного проводника относительно потенциала другого

Здесь описаны некоторые эксперименты, связанные с равенством или разностью потенциалов между двумя изолированными электризованными проводниками. До сих пор мы видели, как электроскоп с проводящим корпусом показывает, что две части одного проводника в равновесии находятся под одним и тем же потенциалом. В этом подразделе описывается, как изменить потенциал одного проводника относительно потенциала другого проводника. Также показаны некоторые процедуры для изменения потенциала части

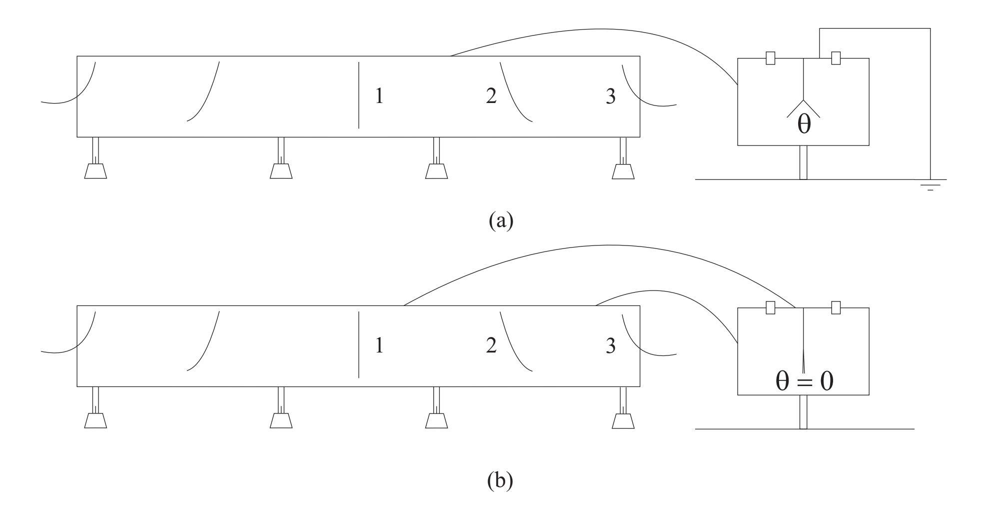


Рис. 10.14: (a) Электроскоп заземлен в точке A и показывает один и тот же угол раскрытия θ, независимо от места, где подключен вторичный электрод. (b) Изолированный электроскоп с участком A, соединенным с одной точкой наэлектризованного прямоугольника, в то время как участок B соединен с другой точкой прямоугольника. Угол раскрытия электроскопа отсутствует.

A этого электроскопа относительно потенциала его части B.

Эксперимент 10.4 - *Приближение наэлектризованного тела к одной из частей электроскопа*

Начнем с электроскопа с проводящим корпусом, заземленным в точке B. Первоначально часть A также должна быть с нулевым потенциалом, т. е. с нулевым углом раскрытия полос электроскопа, Рис. 10.15 (a). Электризуйте отрицательно пластиковую линейку трением о волосы, лист бумаги или хлопковую ткань. Натертая акриловая линейка затем подносится к части заземленного электроскопа. Теперь есть раскрытие θ_1 полос, указывающее, что часть A имеет потенциал, отличный от нуля, Рис. 10.15 (b). Чем ближе линейка, тем больше будет этот угол раскрытия.

Заземлите участок A электроскопа. Когда части A и B имеют нулевой потенциал, полосы электроскопа не раскрываются, Рис. 10.16 (a). Поднесите такую же натертую акриловую линейку к части B электроскопа. Теперь его полоски раскрываются на угол θ_2, указывающий, что часть B снова находится под потенциалом, отличным от нуля, а часть A осталась с потенциалом земли, Рис. 10.16 (b). Чем ближе потертая линейка к точке B, тем больше будет угол раскрытия.

Эксперимент 10.5 - *Поднесение наэлектризованного тела близко к одной из частей электроскопа, когда части A и B соединены проводящей проволокой*

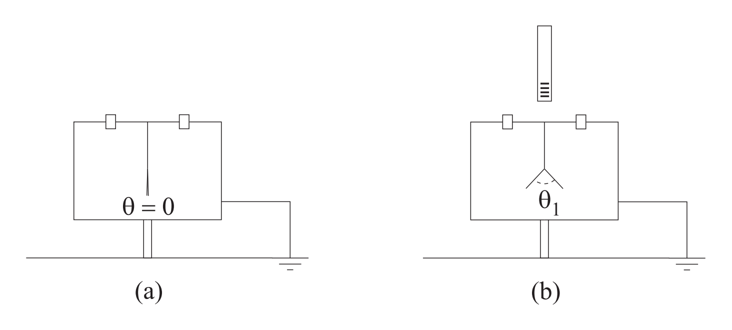


Рис. 10.15: Электроскоп заземлен частью B. (a) Части A и B изначально имеют нулевой потенциал. (b) Когда натертая акриловая линейка приближается к части A, полосы поднимаются.

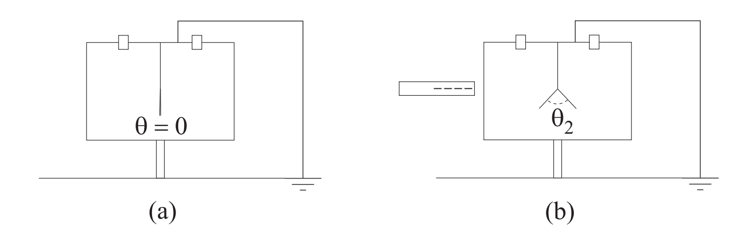


Рис. 10.16: (a) Электроскоп заземлен частью A. Первоначально части A и B имеют нулевой потенциал. (b) Когда натертая акриловая линейка приближается к B, полоски поднимаются.

Предположим теперь электроскоп с проводящим корпусом изолирован от земли. Соедините его части A и B проводящим проводом. Когда натертая акриловая линейка приближается к части A, полоски электроскопа остаются нераскрытыми, Рис. 10.17 (a). Нет раскрытия также при приближении потертой линейки к детали B, Рис. 10.17 (b).

Такое поведение можно легко объяснить. Когда натертая акриловая линейка приближается к электроскопу, потенциалы соединяемых частей A и B возрастают одинаково относительно нулевого потенциала земли. То есть, когда потертая линейка находится рядом с электроскопом, $\phi_A \neq 0$ и $\phi_B \neq 0$, хотя $\phi_A - \phi_B = 0$, независимо от положения или расстояния линейки относительно электроскопа.

Эксперимент 10.6 - *Электризация одной из частей электроскопа*

Эксперимент 10.4 показал, как создать разность потенциалов между частями A и B изолированного электроскопа, когда наэлектризованное тело приближается к одной из его частей. Разность потенциалов может быть создана также электризацией части A или части B отдельно. Начните с электроскопа, изолированного от земли. Его части A и B должны быть изначально разряжены. В электроскопе не будет раскрытия полосок. Элек-

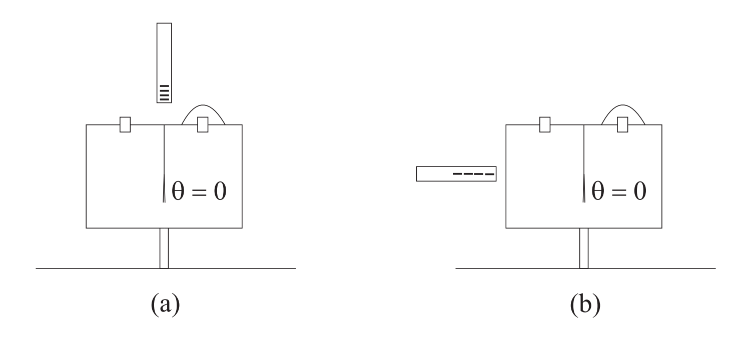


Рис. 10.17: Электроскоп изолирован от земли частями A и B, соединенными проводом. (a) Его полосы остаются закрытыми, когда натертая акриловая линейка приближается к части A. (b) Нет раскрытия также, когда натертая линейка приближается к части B.

тризуйте часть A. Это можно сделать, например, проводя натертую акриловую линейку по краю картона электроскопа части A, как показано на Рис. 10.2 (a). Вы также можете наэлектризовать часть A, прикоснувшись к ее картону прямоугольным коллектором заряда, наэлектризованным как электрофор. Когда часть A электризована, ее полоса поднимается, как в электроскопе с единственной подвижной полосой, показанной на Рис. 10.18 (a), или ее листья открываются, как в электроскопе с двумя подвижными листками, Рис. 10.18 (b).

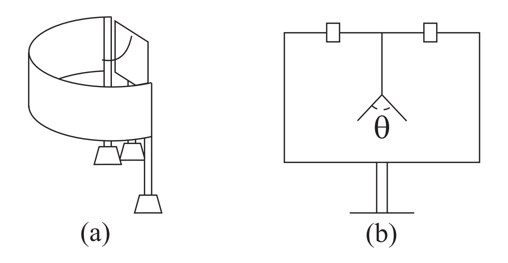


Рис. 10.18: Электроскоп изолирован от земли. Электризуйте только часть A. (a) Когда электроскоп имеет одну подвижную полосу, она поднимается. (b) Когда у электроскопа есть два подвижных листка, они открываются.

Разрядите картон электроскопа, чтобы обе части A и B имели нулевой заряд и имели нулевой потенциал. Наэлектризуйте только часть B. Это можно сделать, соскабливая натертую акриловую линейку цилиндрический картон, показанный на Рис. 10.2 (b), или прикоснувшись к этому цилиндрическому картону с помощью электризованного электрофора. Об электризации части B можно судить по поднятой внешней полоске, Рис. 10.19 (a). Когда есть электроскоп с одной внутренней подвижной полосой на части A, она поднимается, как показано на Рис. 10.19 (b). Когда у электроскопа есть два подвижных листка, они раскрываются, как на Рис. 10.19

(b).

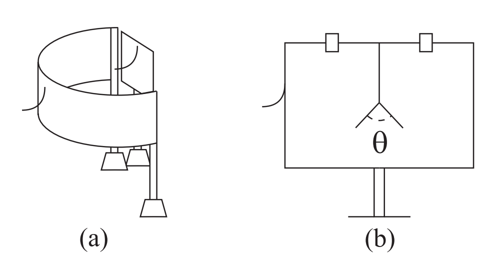


Рис. 10.19: Наэлектризуйте только часть B. (a) Внешняя полоса части B поднимается, указывая на то, что эта часть была электризована. Внутренняя полоса части A также поднимается, указывая на наличие разности потенциалов между частями A и B. (c) Подвижные полосы части A открываются в другой модели электроскопа.

Хотя в этом последнем эксперименте часть A не была наэлектризована, ее внутренняя полоска поднялась (или его листочки раскрылись). Это раскрытие обусловлено тем фактом, что, когда электризовалась только часть B, между частями A и B этого электроскопа появилась разность потенциалов.

Эксперимент 10.7 - *Электризация одной из частей электроскопа, когда части A и B соединены проводом*

Предположим теперь, что части A и B соединены проводом и что электроскоп изолирован от земли. Когда этот электроскоп электризован, его внутренняя полоса остается внизу, как на Рис. 10.20 (a), или две его полосы остаются закрытыми, как на Рис. 10.20 (b). Поднятые полосы на внешних стенках электроскопов, показанных на Рис. 10.20 (a) и (b), были нарисованы только для того, чтобы показать, что этот изолированный электроскоп был электризован в целом.

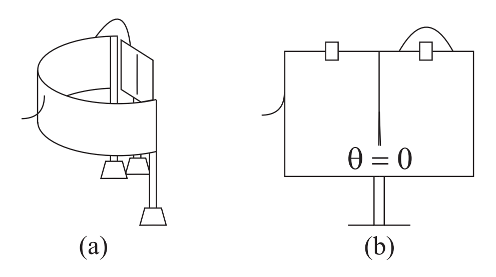


Рис. 10.20: Изолированный электроскоп с частями A и B, соединенными проводником (a) Зарядите электроскоп, и его внутренняя полоска остается внизу. (b) Электризуйте другую модель электроскопа, и его два внутренних листка остаются в нераскрытом состоянии.

10.5 Кельвин и электрометр для измерения разности потенциалов

В 1860 году Кельвин четко указал, что электроскоп или электрометр с проводящим корпусом это инструмент, подходящий для определения равенства или различия потенциалов между двумя проводниками:[6]

> Говорят, что два проводящих тела имеют одинаковый электрический потенциал, если при приведении их в проводящий контакт с двумя электродами электрометра никакого электрического эффекта не возникает. Когда, с другой стороны, электрометр показывает эффект, величина этого эффекта измеряет разницу потенциалов между двумя испытанными таким образом телами. [...]

«Эффект», упомянутый здесь Кельвином, обычно представляет собой угол раскрытия между двумя листами части A электрометра с проводящим корпусом. Основной электрод соединяет часть A с первым проводящим телом, в то время как вторичный электрод соединяет часть B электрометра со вторым проводящим телом.

Мы приводим здесь цитату из другой работы Кельвина 1860 года, наши слова в квадратных скобках:[7]

> 336. *Интерпретация показания электрометра* .— Каждый вид электрометра состоит из клетки или корпуса, содержащего подвижный и фиксированный проводник, по крайней мере один из которых изолирован [электрически от земли] и приведен в металлический контакт тем, что я буду называть главным электродом, проходящим через отверстие в корпусе или клетке, с проводником, электричество которого необходимо проверить. В каждом правильно сконструированном электрометре электрическая сила, испытываемая подвижной частью в данном положении, не должно быть подвержено электрическому влиянию, кроме как путем изменения разности потенциалов между основным электродом и неизолированным проводником или проводящей системой в электрометре. Даже самые лучшие обычные электрометры, построенные до сих пор, не удовлетворяют этому условию, поскольку внутренняя поверхность стекла, из которого обычно изготавливается весь корпус или его часть, подвержена электризации и неизбежно электризуется, когда какая-либо высокая электризация преднамеренно или случайно вводится даже на очень короткое время; следствием этого является то, что движущийся элемент, как правило, не возвращается в свое нулевое положение, когда основной электрод полностью изолирован. Фарадей давно показал, как устранить этот радикальный дефект, покрыв внутреннюю часть стеклянного корпуса тонкой сеткой из фольги; и кажется странным, что даже в настоящее время электрометры для научных исследований, как, например, для исследования атмосферного электричества, должны быть построены с таким плохим и очевидным дефектом, который можно было

[6] [Tho84a, Заметка на стр. 192].
[7] [Tho84c, стр. 258-259].

бы устранить таким простым и совершенным средством. Когда желательно оставить внутри электрометра как можно больше света и обеспечить его четкое видение из любого внешнего положения с минимальным затруднением, клетку, сделанную наподобие клетки для птиц, с очень тонкой проволокой на металлической раме внутри стеклянной шторки, используемая для защиты прибора от воздушных потоков и т. д., можно с выгодой заменить обивкой стекла сеткой из фольги. Таким образом, представляется, что правильно сконструированный электрометр представляет собой инструмент для измерения с помощью движений подвижного проводника разности потенциалов двух проводящих систем, изолированных друг от друга, в одной из которых корпус или кожух устройства является составной частью. Попутно можно заметить, что в специальных исследованиях иногда удобно изолировать [от земли] корпус или клетку аппарата и позволить ему приобрести потенциал, отличный от потенциала Земли, и тогда, как всегда, предметом измерения является разность потенциалов между основным электродом и корпусом или клеткой, в то время как при обычном использовании [заземленного] прибора потенциал последнего такой же, как у земли. Следовательно, мы можем рассматривать электрометр просто как инструмент для измерения разности потенциалов между двумя проводящими системами, изолированными друг от друга; и цель, на которую нацелено совершенствование любого типа электрометра (более или менее чувствительного, в зависимости от предмета исследования, для которого он предназначен), состоит в том, чтобы *точные оценки в разности в потенциалов в абсолютном измерении, могли быть немедленно получены из его показаний.*

Кельвин здесь имел в виду работу Фарадея 1838 года, где он использовал торсионный баланс Кулона в качестве электрометра. Он усовершенствовал это устройство, а именно, покрыл внутреннюю часть стеклянного корпуса заземленным проводящим материалом. Этот стеклянный футляр первоначально помещался вокруг тел, которые притягивали или отталкивали друг друга, чтобы исключить помехи от воздушных потоков. Покрывая его проводящим материалом, Фарадей смог исключить воздействие внешних наэлектризованных тел на внутренние тела:[8]

Чтобы индуктивное действие внутри электрометра было равномерным во всех положениях отталкиваемого шарика и во всех состояниях устройства, две полосы оловянной фольги, шириной около дюйма каждая, были прикреплены к внутренней поверхности стеклянного цилиндра с полным охватом, на расстоянии 0,4 дюйма друг от друга, и на такой высоте, чтобы промежуточная чистая поверхность находилась в одной горизонтальной плоскости с рычагом и шариком. Эти полосы были связаны друг с другом и с землей, и, будучи совершенными проводниками, всегда оказывали равномерное влияние на наэлектризованные шарики внутри, чего нельзя сказать, как я обнаружил, о стеклянной поверхности из-за нерегулярности состояния стекла в разное время.

[8][Far38, статья 1180, стр. 444].

Глава 11

Электрические разряды в воздухе

В главе 9 мы описали так называемую силу (или мощность) точек, т. е. некоторые эффекты, связанные с заостренными частями электризованных проводников. Есть некоторые другие чрезвычайно важные эффекты подобных точек, связанные с электрическими разрядами и искрами в воздухе. Некоторые из этих явлений будут обсуждаться в этой главе:

1. Воздух легче ионизируется вблизи заостренных участков электризованных проводников, чем вблизи тупых участков. Когда воздух ионизован, он ведет себя как проводник.

2. Тогда легче электризовать проводник через ионизованный воздух вблизи острых точек. Поднесите наэлектризованное тело близко к заостренной области изолированного проводника. Тело и проводник не должны касаться друг друга. Обмен наэлектризованными частицами происходит через проводящий воздух между ними.

3. Также возможно разрядить первоначально наэлектризованный проводник через его заостренные области, когда эти точки находятся близко к заземленному проводнику. То есть электризованному проводнику не обязательно касаться заземленного проводника, чтобы его разрядить.

11.1 Вспышки

Мы можем провести несколько простых и чрезвычайно интересных экспериментов, закрепив иглу, булавку или металлическую проволоку на простом электроскопе.[1] Игла или проволока могут быть закреплены на обратной

[1] [FM91, стр. 62], [Ferb, Pára-raios: Igrejinha, p. 40], [Gas03, стр. 239-243] и [LSB08].

стороне электроскопа с помощью клейкой ленты. Небольшая его часть, от 1 до 2 см, должна выступать за край картона, Рис. 11.1.

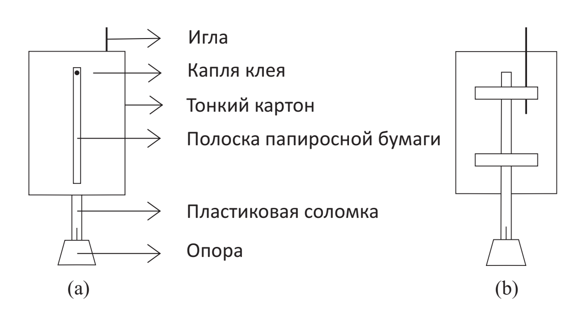


Рис. 11.1: (a) Вид спереди электроскопа с иглой, закрепленной на его задней стороне. (b) Вид сзади.

Эксперимент 11.1 - *Электризация электроскопа на расстоянии*

Электризуйте отрицательно пластиковую соломку или акриловую линейку, втирая ее в волосы, бумажную салфетку или хлопковую ткань. Держите ее горизонтально на несколько сантиметров выше кончика иглы. Ничего не происходит. Когда она становится ближе к электроскопу, примерно на расстоянии 1 см от кончика, тонкая полоска бумажной салфетки электроскопа поднимается. С удалением соломы, полоса падает.

Повторите эту процедуру с первоначально разряженным электроскопом, Рис. 11.2 (a).

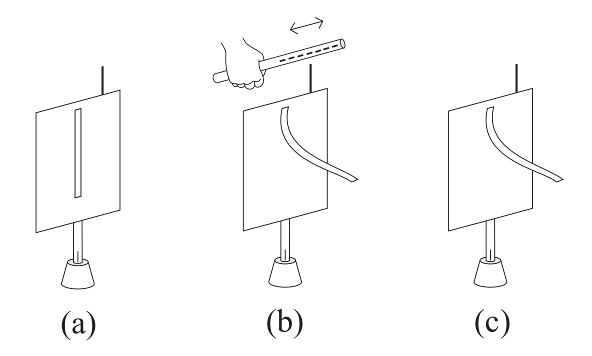


Рис. 11.2: (a) Разряженный электроскоп с иглой на задней стороне. (b) Потертая соломка очень близко к кончику иглы, двигаясь туда и обратно горизонтально. Полоска отклоняется от электроскопа. (c) При удалении соломки, полоска остается в приподнятом положении!

На этот раз наэлектризованная соломка должна быть поднесена еще ближе к игле, находясь на расстоянии от 1 до 3 мм от ее кончика, т. е. *не*

касаясь ее. Полоска папиросной бумаги поднимется. Натертую соломку следует перемещать горизонтально туда и обратно над острием иглы, всегда оставаясь очень близко к ней, Рис. 11.2 (b). Кроме того, соломка должна вращаться или поворачиваться вокруг своей продольной оси во время колебательного движения, подставляя игле различные области поверхности. Удалите соломку подальше от электроскопа. Полоса остается в отклоненном от картона электроскопа положении, Рис. 11.2 (c).

Полоска не падает после удаления натертой соломки. Этот факт доказывает, что электроскоп стал электризован в результате этой процедуры. *Это явление представляет нечто новое, а именно, электризацию электроскопа без контакта с другим наэлектризованным телом!* Мы не обсуждали этот механизм зарядки в томе 1 этой книги. До сих пор мы рассматривали только три других способа зарядки, а именно: (I) трением, как в янтарном эффекте, раздел 1.1; (II) при контакте проводника с другим наэлектризованным телом, как в механизме ПКО, раздел 4.4; (III) электризация индукцией или поляризацией.[2]

Эксперимент 11.2 - *Определение знака заряда, приобретенного электроскопом*

Рассмотрим электроскоп, заряженный по методике эксперимента 11.1. Медленно поднесите ту же натертую соломку к поднятой полоске заряженного электроскопа. Натертая соломка должна быть горизонтальной, на той же высоте, что и нижний конец выступающей полосы. Подносить нужно очень медленно, чтобы не допустить их соприкосновения. Внимательно следите за направлением, в котором полоса пытается двигаться, то есть движется ли она к натертой соломе или от нее. Аккуратно выполнив этот эксперимент, заметьте, что полоса движется к картону, то есть отходит от приближающейся натертой соломки.

Полоса может двигаться туда и обратно с натертой соломой. Для этого переместите соломку к полосе и от нее. Полоска будет двигаться вместе с соломкой по направлению к картону и от нее. Если вы хотите наблюдать это колебательное движение полосы, амплитуда или величина движения натертой соломки должна быть низкой. То есть используйте движения с небольшим размахом. Избегайте также приближения натертой соломки очень близко к полосе, Рис. 11.3.

Такое поведение полоски показывает, что электроскоп с иглой наэлектризован зарядом того же знака, что и натертая соломка, поскольку между ними существует отталкивание. Затем можно представить заряды электризованного электроскопа как имеющие тот же знак, что и заряды натертого пластика. В настоящем примере эти заряды будут отрицательными.

Эксперимент 11.3 - *Разрядка электроскопа на расстоянии*

Обратный эксперимент 11.1 с использованием электроскопа с иглой на его задней стороне. Начните с заряженного электроскопа, убедившись по

[2] Как обсуждалось в разделе 7.5 [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

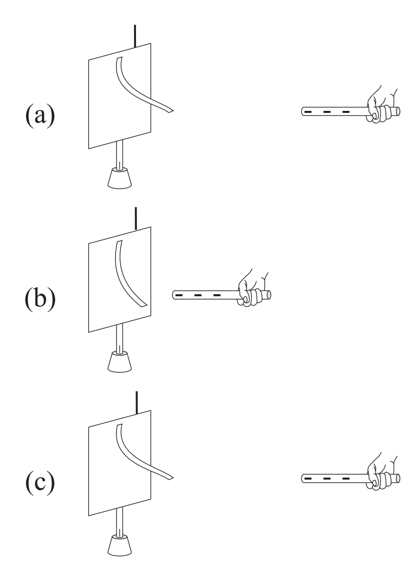


Рис. 11.3: Отталкивание между отрицательно заряженной соломкой и электроскопом, заряженным этим натертым пластиком. (b) Когда соломка приближается к электроскопу, полоска падает. (a) и (c): Когда пластик отодвигается от электроскопа, полоска поднимается.

его поднятой полоске, что электроскоп действительно заряжен, Рис. 11.4 (a).

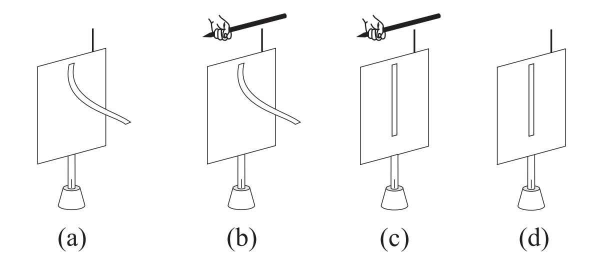


Рис. 11.4: (a) Заряженный электроскоп. (b) и (c): Когда деревянный шампур или металлическая проволока подносятся очень близко к кончику иглы, не касаясь ее, полоса падает. (d) При удалении шампура полоса остается внизу.

Держите рукой горизонтальный деревянный вертел или металлический провод. Медленно поднесите его очень близко к заряженному электроскопу, на расстоянии от 1 до 3 мм от кончика иглы, *не касаясь его*. Через несколько секунд полоса падает, становясь вертикальной и касаясь картона, Рис. 11.4 (b) и (c). При удалении шампура или провода полоса остается внизу, Рис. 11.4 (d).

В этом эксперименте электроскоп разряжался на расстоянии, без кон-

такта. Нужно было только поднести заземленный проводник (деревянный вертел или металлический провод, удерживаемый в руке) очень близко к кончику иглы.

Эксперимент 11.4 - *Влияние количества игл на интервал времени, требуемый для разряда электроскопа*

Сравните временной интервал, необходимый для разрядки электризованного электроскопа, в зависимости от наличия или отсутствия иглы на ее задней стороне. Рассмотрим два электроскопа одинакового размера и формы. Первый – обычный электроскоп без иглы. Второй электроскоп снабжен иглой с наконечником на его задней стороне, которая выступает за край картона.

Электроскопы должны быть отделены друг от друга. Поскребите натертой соломкой или акриловой линейкой по их картонам. Они должны быть одинаково наэлектризованы. На равенство электризации указывает то, что обе полоски подняты на одинаковые углы θ относительно своих картонов. Удалите натертую соломку и измерьте время разряда обоих электроскопов, т. е. интервал времени, необходимый для падения полос, пока они не коснутся своих картонов. Легко заметить, что электроскоп с иглой разряжается быстрее, чем другой электроскоп.

Выполните этот эксперимент с третьим электроскопом, содержащим две или три иглы. Одна из игл может выступать за картон вертикально вверх, а две другие сбоку, например, одна с правой стороны, а другая – с левой. Электризуйте одинаково все три электроскопа и измерьте время их разряда. Чем больше количество игл у электроскопа, тем быстрее он разряжается.

Эксперимент 11.5 - *Перенос зарядов между двумя проводниками, отделенными друг от друга*

Используйте две пустые банки содовой, A и B. Приклейте верхний конец тонкой полоски папиросной бумаги на каждую из них. Зафиксируйте горизонтально булавку или иглу в одной из этих банок, пропуская ее через отверстие в корпусе банки. Она должна быть закреплена с помощью клейкой ленты. Кончик этой горизонтальной иглы должен выходить из банки. Каждая банка должна опираться на изолирующую плиту из пенопласта. Булавка, торчащая из банки A, должна быть расположена очень близко к центру банки B, с острием на расстоянии 1 или 2 мм от B. Первоначально обе банки должны быть разряжены, Рис. 11.5 (a).

Электризуйте только банку A, несколько раз соскоблив его верхний край натертой акриловой линейкой, Рис. 11.5 (b). Удалите натертую акриловую линейку. Через некоторое время обе банки становятся электризованными, Рис. 11.5 (c).

Этот эксперимент показывает, что мы можем электрифицировать банку B на расстоянии от электрифицированной банки A.

Эксперимент 11.6 - *Еще один пример переноса зарядов на расстояние*

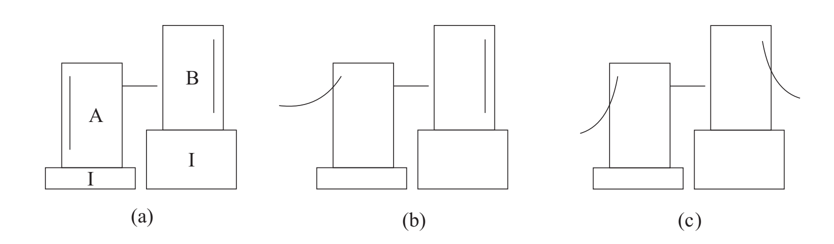


Рис. 11.5: (a) Две разряженные токопроводящие банки, изолированные от земли с помощью пластин из пенопласта I. Из одной банки торчит горизонтальная булавка, острый конец которой находится очень близко к другой банке. (b) Электризуйте только банку A, проведя натертым пластиком по ее телу. (c) Через некоторое время обе банки электризуются, как показывают их поднятые полоски.

Обратный порядок действий в эксперименте 11.5. Электризуйте банку B, соскабливая натертую акриловую линейку по ее верхнему краю, Рис. 11.6 (b). Удалите потертую линейку. Через некоторое время обе банки становятся электризованными, Рис. 11.6 (c).

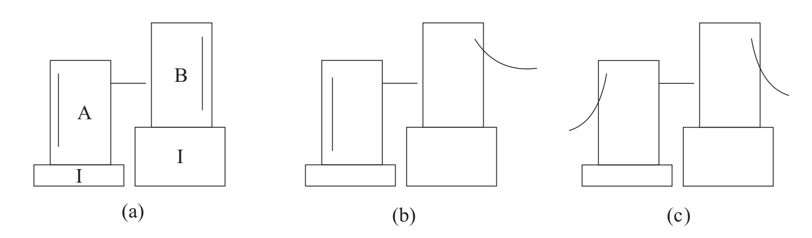


Рис. 11.6: (a) Две разряженные и изолированные банки с булавкой в одной из них. (b) Электризованная банка B. (c) Через некоторое время обе банки электризуются.

В этом эксперименте мы наэлектризовали банку A со штифтом без контакта с наэлектризованной банкой B.

11.2 Комментарии к этим экспериментам

Эксперименты раздела 11.1 чрезвычайно интересны.

В эксперименте 11.1 использовался разряженный электроскоп с торчащей из него металлической булавкой. Натертую соломку подносили очень близко к кончику булавки. Через некоторое время электроскоп стал наэлектризованным. Между наэлектризованной соломкой и острием иглы не было контакта. Поэтому электризация проходила через воздух. Сухой воздух обычно ведет себя как изолятор для электростатических экспериментов. Этот вывод можно сделать из того факта, что простой электроскоп

без иглы может оставаться наэлектризованным в течение нескольких минут, хотя он и окружен воздухом. С другой стороны, в эксперименте 11.1 воздух вокруг остроконечной иглы вел себя как проводник. Многие из его молекул ионизированы или электризованы. Поскольку эти ионы подвижны, возможен обмен наэлектризованными частицами между наэлектризованной соломкой, ионами воздуха и электроскопом.

В эксперименте 11.3 использовался первоначально заряженный электроскоп с торчащей из него металлической булавкой. Заземленный проводник был подведен очень близко к кончику иглы. Через некоторое время электроскоп разрядился. Заземленным проводником был деревянный вертел или металлический провод. Электроскоп разряжался без помощи обычного механизма заземления, который имеет место при контакте. В этом эксперименте, с другой стороны, деревянный шампур был поднесен близко к кончику иглы, не касаясь его. Воздух вокруг кончика вел себя как проводник, когда деревянный вертел был поднесен близко к нему. Этот деревянный вертел или металлический провод был заземлен через контакт с держащей его рукой . Когда его подносили очень близко к кончику иглы, проводящий воздух вокруг него позволял разряжать электроскоп.Эксперимент 11.4 показал, что наличие острых точек на электризованном проводнике, изолированном от земли, облегчает его разрядку через воздух вокруг него. Здесь тоже воздух вокруг точек электризованных проводников ведет себя как проводник, облегчая разрядку электроскопа.

Это меняющееся поведение воздуха от изолятора к проводнику является сложным явлением, которое зависит от нескольких факторов. Мы не будем объяснять в этой книге, как воздух может изменить свое поведение от изолирующего к проводящему. Мы опишем только некоторые из его основных свойств. Этот переход не является ни медленным, ни постепенным – он происходит в мгновение ока. Называется это *коронным разрядом.* Когда разность потенциалов между двумя точками в воздухе меньше определенного критического значения, воздух ведет себя как хороший изолятор. Выше этого критического значения, он ведет себя как хороший проводник. Максимальное электрическое поле (разность напряжений на единицу расстояния), которое изолятор может выдержать в идеальных условиях без пробоя, то есть без нарушения его изолирующих свойств, называется *диэлектрической прочностью* материала. Это критическое значение зависит от многих факторов. Для воздуха, в частности, оно зависит от атмосферного давления. Диэлектрическая прочность воздуха при нормальном давлении ($P = 1\ atm = 1 \times 10^5\ N/m^2$) составляет примерно $3 \times 10^6\ V/m = 3000\ V/mm$.[3]

Рассмотрим, например, эксперимент 11.1. Предположим, что электроскоп можно заряжать, когда расстояние между наэлектризованной соломкой и кончиком иглы составляет 2 мм. В этом случае между соломой и электроскопом будет разность потенциалов примерно 6000 В.

Из экспериментов, подобных этому, или из измерения расстояния меж-

[3][TM09, стр. 91 и 125].

ду двумя проводящими сферами в эксперименте Кельвина с капельницей, необходимого для создания искры, мы заключаем, что в обычных электростатических экспериментах мы имеем дело с разностями потенциалов в диапазоне от 1000 В до 10000 В.[4] Хотя эти разности потенциалов намного больше, чем разности потенциалов в обычных батареях (несколько вольт), количество электрических зарядов, участвующих в электростатических экспериментах, обычно очень мало.

Здесь следует подчеркнуть, что искры в воздухе не связаны с извлечением электронов из электродов. Чтобы удалить электроны с металлических поверхностей при низких температурах, требуется напряженность электрического поля порядка 10^9 V/m. Это явление известно как *электронная эмиссия поля* или *холодная эмиссия.* Это значение на три порядка выше, чем критическое электрическое поле в 3×10^6 V/m, необходимое для ионизации воздуха при атмосферном давлении.[5]

11.3 Молниеотводы

Эксперименты 11.1 и 11.3 показывают, что можно заряжать или разряжать электроскоп на расстоянии. Эксперимент 11.4 показывает, что воздух вокруг наэлектризованной заостренной области проводника ведет себя как проводник. Такое проводящее поведение воздуха вблизи электризованных заостренных проводников лежит в основе работы молниеотводов. Этот рабочий механизм можно проиллюстрировать несколькими простыми экспериментами.

Эксперимент 11.7 - *Моделирование громоотвода*

Вырежьте тонкий картон в форме игрушечного домика. Его можно закрепить в земле с помощью прорези в деревянной доске или плите. Приклейте верхний конец тонкой полоски папиросной бумаги на домик, как индикатор возможных электрических эффектов. Металлическая проволока длиной 20 или 30 см закреплена вертикально рядом с домом. Он должен быть изолирован от дома кусочками пенопласта или жесткого пластика. Нижний конец провода должен быть вмонтирован в деревянную доску. Это устройство будет представлять собой громоотвод, Рис. 11.7 (a), на котором буква I обозначает изолирующие материалы.

В качестве модели электризованного облака мы будет использовать простой электроскоп, поддерживаемый изолирующей соломкой. Электризуйте это облако, соскабливая натертую акриловую линейку по верхнему краю картона. Степень отклонения ее полоски указывает на количество электризации облака. Держите его за изолирующую соломку. Поднесите нижний край картона ближе к верхнему концу металлической проволоки, избегая

[4] [Tho], [Llo80], [Cam06], [CA08] и разделы 6.6, 7.11 и 7.12 из [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

[5] [Sav, стр. 249], [Sil10c], [Sil11] и [Sil16].

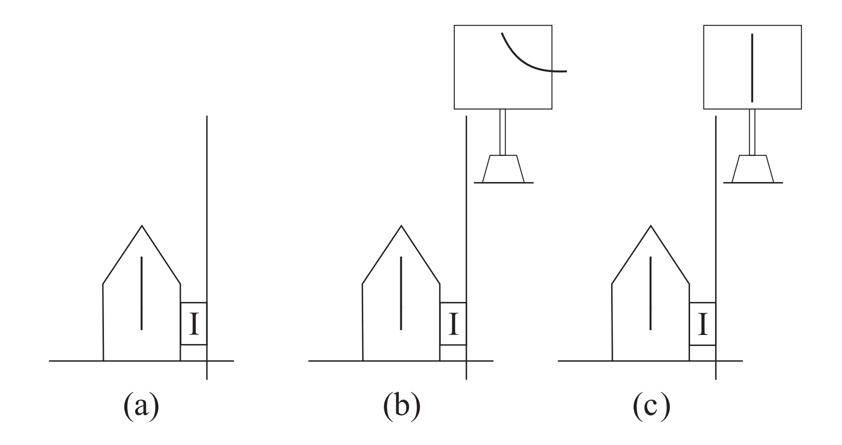


Рис. 11.7: (a) Молниеотвод – это проводник, изолированный от дома или здания, которого он защищает. Его нижний конец проникает в землю. (b) Поднесите нижний край заряженного электроскопа очень близко к верхнему концу провода. (c) Электроскоп разряжается громоотводом. Дом и его тонкая полоска папиросной бумаги не подвержены влиянию разряда.

контакта, на небольшое расстояние от 1 до 3 мм, Рис. 11.7 (b). Тогда электроскоп разряжается без контакта с металлической проволокой, Рис. 11.7 (c). Кроме того, дом не пострадал от этого разряда. То есть полоса папиросной бумаги не подвергается воздействию в течение всего этого процесса, оставаясь всегда вертикальной.

Этот эксперимент иллюстрирует рабочий механизм громоотвода и его защитную роль. Молниеотвод представляет собой металлический провод, нижний конец которого пронизывает землю. Его верхний конец возвышается над домом или зданием, которого он защищает. Он изолирован от этого здания изоляционным материалом I. Предположим, электризованное облако проходит над громоотводом. Верхний конец стержня электризуется зарядом со знаком противоположным знаку заряда в облаке. Когда между облаком и землей существует высокое напряжение, воздух вокруг наконечника стержня будет вести себя как проводник. Этот проводящий канал может разряжать облако через громоотвод.

11.4 Молниеотвод изолированный от земли

Молниеотвод, предназначенный для защиты зданий от разряда облака, должен быть заземлен.

С другой стороны, когда металлическая проволока изолирована от земли, мы имеем так называемый *испытательный стержень* или *громоотвод, изолированный от земли.* Он используется для сбора части электричества, накопленного в облаках или в атмосфере. Затем мы можем проверить или определить знак собранного заряда, его величину на разных высотах

или местах расположения стержня, его величину в зависимости от местной погоды, в разные часы или в разные месяцы года. Крайне опасно проводить реальные эксперименты с испытательными стержнями на открытом воздухе для изучения электричества облаков. В этой книге мы проведем несколько поучительных экспериментов с использованием небольших металлических проводов в качестве испытательных стержней. Электризованные облака будут моделироваться заряженными электроскопами, изолированными от земли.

Эксперимент 11.8 - *Удаление зарядов с электроскопа*

Металлическая проволока закреплена вертикально на толстой плите из пенопласта. Нижний конец этого провода должен быть расположен в центре пластины и не должен касаться земли. Этот провод будет изолирован от Земли. Верхний конец провода будет снаружи пластины, на открытом воздухе. Изолированный электроскоп, первоначально разряженный, поддерживается над проводом, при этом нижний край его картона находится близко к верхнему концу провода на расстоянии 1–3 мм от его наконечника. Металлический версориум расположен близко к центру вертикального провода, направленного в произвольном направлении. 11.8 (a).

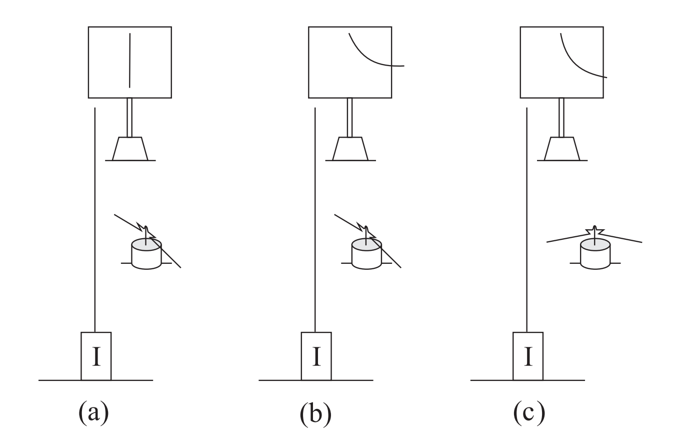


Рис. 11.8: (a) Вертикальный испытательный провод изолирован от земли. Близлежащий версориум указывает в произвольном направлении. Электроскоп изначально разряжен. (b) Заряженный электроскоп. (c) Через некоторое время полоса немного опускается, и электризованный провод поворачивает версориум к нему.

Затем электроскоп электризуют, царапая его верхний край потертой соломкой. Его полоса сразу поднимается, Рис. 11.8 (b). Удалите натертую соломку. Через некоторое время поднятая полоса немного опускается, а версориум указывает на вертикальную проволоку, Рис. 11.8 (c).

Этот эксперимент не связан с электростатической индукцией. То есть ориентация версориума не связана с поляризацией провода, которая имеет

место, когда заряженный электроскоп находится близко к проводу. Предположим, что электроскоп заряжен отрицательно. Верхний конец изолированного провода будет индуцирован положительным электричеством, а его нижний конец – отрицательно электризован. Индукция происходит почти мгновенно, одновременно с электризацией электроскопа.

Ориентация версориума, с другой стороны, происходит только через несколько секунд после электризации электроскопа. Такая ориентация обусловлена постепенной электризацией провода в целом, что происходит из-за ионизации воздуха вокруг верхнего конца провода. Поскольку провод становится отрицательно электризованным, это вызывает перераспределение зарядов в соседнем версориуме, ориентируя его к проводу.

Этот эксперимент можно также выполнить с горизонтальной металлической проволокой, закрепленной на двух чашках из пенопласта. Версориум следует размещать в одной плоскости провода, рядом с ним и указывать в произвольном направлении, Рис. 11.9 (a). Заряженный электроскоп затем подносится очень близко к проводу, его центр находится в плоскости провода. Кончик проволоки должен находиться на расстоянии от 1 до 3 мм от вертикальной границы картона. Через некоторое время версориум ориентируется на проволоку, Рис. 11.9 (b).

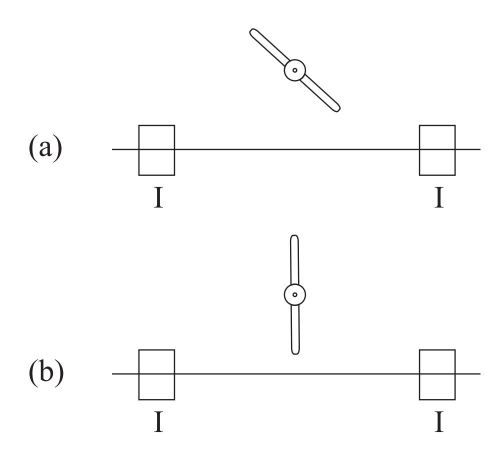


Рис. 11.9: (a) Горизонтальный испытательный стержень изолирован от земли. Версориум, расположенный близко к его центру, указывает в произвольном направлении. (b) После того, как проволока электризована, она ориентирует версориум в направлении к проволоке.

11.5 Искры в механизме ПКО

Механизм ПКО обсуждался в разделе 4.4: изолированный и легкий проводник притягивается заряженным телом, происходит передача электричества с последующим отталкиванием проводника. Эксперимент 4.3 продемонстрировал, как работает механизм. Небольшой проводящий диск, изначально

нейтральный и изолированный от земли, был привлечен электризованным изолятором, коснулся его, а затем оттолкнулся от него. Диск приобрел заряд того же знака, что и электризованный изолятор. Притяжение происходило за счет поляризации диска. Эта поляризация была вызвана находящимся рядом электризованным пластиком. Обычно передача электричества в механизме ПКО происходит во время контакта между маленьким проводником и близлежащим заряженным телом.

Однако этот контакт не обязателен. То есть механизм ПКО может иметь место без контакта между заряженным телом и изолированным проводником. Иногда, когда маленький проводник находится достаточно близко к электризованному изолятору, происходит передача зарядов между ними и окружающим воздухом, электризуя проводник. В этом процессе маленький проводник приобретает заряд того же знака, что и заряд ближайшего электризованного тела. Когда происходит эта передача зарядов, между маленьким проводником и наэлектризованным телом возникает отталкивание, хотя они никогда не касались друг друга физически. В этом случае, т. е. когда они находятся очень близко друг к другу, воздух между ними может вести себя как проводник. Затем в воздухе возникает небольшая искра с обменом наэлектризованных частиц между небольшим проводником, ионами воздуха и наэлектризованным изолятором. Через некоторое время маленький проводник электризуется, а затем отталкивается от изолятора.

Сам Дюфе, который обнаружил механизм ПКО, знал, что для отталкивания не требуется контакта. Иногда маленький проводник может получить суммарный заряд того же знака, что и заряд электризованного тела, без контакта, если сблизить их достаточно близко.[6]

11.6 Неоновая лампа

В магазинах электроники можно приобрести так называемую *неоновую лампу*, Рис. 11.10.

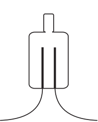


Рис. 11.10: Неоновая лампа.

Это газоразрядная лампа, используемая в качестве индикатора в электронных приборах, тестерах напряжения и т. д. В электростатических экспериментах ее можно использовать для указания не только того, заряжено тело электричеством или нет, но и для определения знака заряда.

Эксперимент 11.9 - *Трение неоновой лампы об отрицательно заряженную линейку*

[6] Раздел 4.8 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

Держите рукой за одну из ножек неоновой лампы и коснитесь другой ножкой нейтральную акриловую линейку. Лампа не включается, Рис. 11.11 (a).

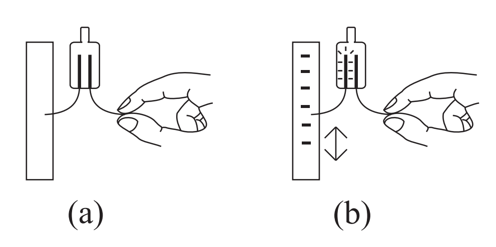


Рис. 11.11: (a) Неоновая лампа не загорается, когда она касается нейтральной акриловой линейки. (b) Потрите одну из его ног отрицательно наэлектризованной линейкой. Обратите внимание, что мигает только электрод, подключенный к линейке.

Акриловая линейка заряжается отрицательным электричеством трением о волосы, бумажную салфетку или хлопчатобумажную ткань. Держите одну ногу неоновой лампы пальцем и коснитесь другой ногой наэлектризованную часть линейки, потирая ею вдоль линейки в затемненной комнате. Мигает только электрод, подключенный к отрицательной линейке, Рис. 11.11 (b).

Эксперимент 11.10 - *Прикосновение неоновой лампой к положительно или отрицательно заряженному электроскопу*

Электризуйте два электроскопа – один положительно, а другой отрицательно. Электризацию можно получить, соскабливая положительно наэлектризованную пластиковую линейку о верхний край картона одного электроскопа и отрицательную пластиковую линейку о край картона другого электроскопа. Эти противоположные электризации электроскопов также могут быть легко получены с помощью индукции или поляризации.[7] Заряженные электроскопы затем удаляются друг от друга.

Держите одну ногу неоновой лампы и коснитесь другой ногой положительного электроскопа в затемненной комнате. Он разряжается практически сразу. Во время разряда мигает только электрод в контакте с рукой, Рис. 11.12 (a).

Повторите ту же процедуру с отрицательно заряженным электроскопом. Обратите внимание, что лампа также мигает во время разряда. Однако в этом случае мигает только электрод, подключенный к электроскопу, Рис. 11.12 (b).

Этот эксперимент можно повторить с электрофором.[8] Когда коллектор заряда электрофора отрицательно наэлектризован, только электрод, касающийся его, будет мигать. Когда, с другой стороны, нога неоновой лампы

[7] Раздел 7.5 [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].
[8] [Ferb, Lâmpada de néon, p. 32; Lâmpada fluorescente, p. 34; e Eletróforo de Volta, p. 38].

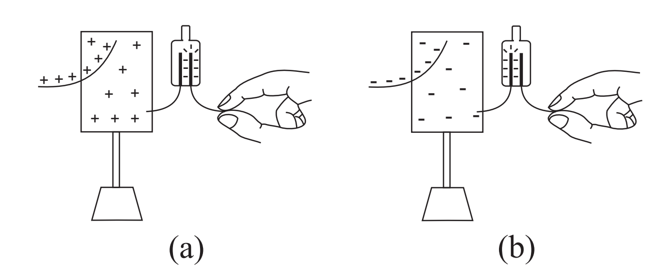


Рис. 11.12: Лампа мигает, когда одна из его ног касается заряженного электроскопа, а другая нога удерживается в руке. (a) Только электрод, подключенный к руке, мигает, когда электроскоп положительно наэлектризован. (b) Только электрод, подключенный к электроскопу, мигает, когда электроскоп отрицательно электризован.

касается положительно заряженного электрофора, только электрод, подключенный к руке человека, держащего лампу, будет мигать.

Поэтому неоновая лампа – очень полезное устройство. Во-первых, она может указывать, заряжен или разряжен определенный проводник. Когда проводник первоначально наэлектризован, неоновая лампа также покажет, заряжен ли он положительно или отрицательно.

11.7 Грей, Франклин, сила точек и электрическая природа молнии

Некоторые ранние ученые заметили несколько аналогий между маленькими искрами и электрическими разрядами, полученными в проведенных ими электростатических экспериментах, и молниями, наблюдаемыми во время грозы. Они предположили, что эти два класса явлений есть по сути один и тот же эффект, но с огромной разницей в масштабе. Одним из таких исследователей был Стивен Грей. В письме к секретарю Королевского общества в 1734 году, опубликованном в 1735 году, он описал несколько экспериментов, где он получил искры и вспышки света с помощью своей электризованной стеклянной трубки, когда заостренные проводники были расположены очень близко к электризованным телам. Мы цитируем здесь из последнего раздела его статьи, с нашими цифрами и нашими словами в сносках и в квадратных скобках:[9]

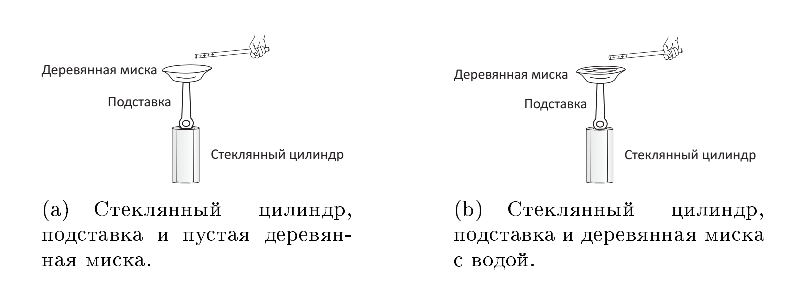
> **8.** Затем я взял пустую деревянную тарелку и поставил ее на подставку[10]; затем приложил трубку, [то есть натертую стеклянную трубку] и палец[11] рядом с тарелкой, появился свет, но пальца не дернуло и не

[9] [Grac, стр. 24], [Bos11, Глава 10] и [BAC12, Глава 11, с. 221-238].

[10] В этой статье Грей упоминает, что эта подставка была установлена на цилиндрическое стекло. Стеклянный цилиндр вел себя как изолятор.

[11] “ *Пал-* ” в оригинале. Вероятно, он имел в виду палец.

щелкнуло. Затем я наполнил тарелку водой, удерживая трубку над поверхностью воды, появилось больше света, чем когда палец был приложен к пустой тарелке, но без щелчка,[12] до тех пор, пока удерживая трубку после того, как она была хорошо потерта, в пределах двух или трех дюймов от пальца, который держался у поверхности воды, а затем палец был нажат, и раздался щелкающий звук, как при проведении эксперимента с оловянной пластиной.[13]



(a) Стеклянный цилиндр, подставка и пустая деревянная миска.

(b) Стеклянный цилиндр, подставка и деревянная миска с водой.

Рис. 11.13: Стеклянный цилиндр, деревянная подставка и миска.



Рис. 11.14: Палец держится у поверхности воды. Когда хорошо потертая стеклянная трубка удерживалась в пределах 2 или 3 дюймов от пальца, палец дернулся и раздался треск.

Грей продолжил свое описание эксперимента следующими словами:

> На основе этих экспериментов мы видим, что настоящее пламя огня вместе со взрывом и кипением холодной воды[14] могут быть вызваны электричеством; и хотя эти эффекты в настоящее время существуют, но в *minimis*, вероятно, со временем может быть найден способ собрать большее его количество; и, в результате, увеличить силу этого

[12] Рис. 11.13 иллюстрирует, как этот эксперимент мог выглядеть.

[13] Рис. 11.14 иллюстрирует, как этот эксперимент мог выглядеть.

[14] Вероятно, это «пламя огня» относится к искре или свету, излучаемому объектами, «взрыв» относится к слышимому щелкающему шуму, в то время как «кипение холодной воды» относится к каплям воды, собранным на поверхности трубки, когда она находилась близко к поверхности воды.

> электрического огня,[15] который, как указывают некоторые из этих экспериментов (*Si licet magnis componere parva*)[16] похоже имеет ту же природу, что и гром и молния.[17]

Грей описал несколько других экспериментов, связанных с силой точек с искрами в воздухе. Он также провел несколько экспериментов, связанных с сохранением электрических зарядов.[18] Эти эксперименты не будут обсуждаться в этой книге.

Бенджамин Франклин (1706-1790) был самоучкой, который работал в различных областях. В 1743 и 1753 годах он посвятил себя электрическим экспериментам, услышав некоторые публичные выступления на эту тему.[19] Он получил в подарок стеклянную трубку, которая может быть легко наэлектризована трением и которая ведет себя как хороший изолятор. Он также приобрел некоторые из основных электрических инструментов того времени. Он сообщил своим европейским коллегам о своих экспериментах, проведенных в Филадельфии, посредством писем, которые получили широкую известность. Они были собраны и опубликованы в виде книги в Лондоне в 1751 году. Эта работа была расширена и опубликована в нескольких изданиях вплоть до 1774 года, известная под названием: *Эксперименты и наблюдения в области электричества*.[20] Эта книга оказала большое влияние, будучи переведенной на несколько языков. Он придумал ряд научных терминов в области электричества, таких как «плюс и минус» или «положительный и отрицательный», «батарея» и т. д. Он дал объяснение действующему механизму лейденской банки, распространил использование параллельного пластинчатого конденсатора, отмечал огромную значимость силы точек, являлся также одним из тех ученых, кому принадлежит заслуга установления и использования закона сохранения электрических зарядов.[21] Он назвал электризованные частицы разными именами, такими как «электрический огонь», «электрическое вещество» и «электрическая жидкость». Он придерживался концепции одной электрической жидкости. Он полагал, что все вещества содержали определенное количество этой жидкости. Когда в теле было больше электрической жидкости, чем в нормальном состоянии, оно было «положительно наэлектризовано». Аналогично, если в нем было меньше электрической жидкости, чем нормальное количество, оно было «отрицательно электризовано». До сих пор мы пользуемся его номенклатурой, но с другим смыслом, а именно, предполагая существование

---

[15] Более поздние эксперименты с лейденской банкой подтвердили предсказания Грея, см. главу 12. Тогда можно будет собирать электричество и хранить его долгое время. Также можно будет увеличить размер и мощность электрических искр, создаваемых экспериментально.

[16] Эта цитата взята из стихотворения римского поэта Вергилия (70-19 гг. до н.э.), *Георгики*, 4.176. Вольный перевод: если мы можем сравнить маленькие вещи с большими.

[17] предположение Грея было подтверждено в 1750-х годах экспериментами, проведенными по идеям Бенджамина Франклина.

[18] [Bos11] и [BAC12]; см. также раздел 6.10 [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

[19] [Hei99, Глава 14], [SP06], [SP08] и [MB17].

[20] [Fra69] , [Fra41] и [Mor04b].

[21] [Coh66], [Coh96] и [Hei99, Глава 14: Бенджамин Франклин].

двух видов электричества или двух видов электрического заряда.

Со своей концепцией сохранения электрических зарядов Франклин отмечал, что электричество не создавалось, не генерировалось и не производилось ни во время трения между двумя веществами, ни в каком-либо другом процессе электризации. Единственное, что происходило во время трения или в любом другом процессе электризации, – это перераспределение или перенос заряда. То есть одно из тел получает точно такое же количество электрической жидкости, которое теряется другим телом.

В своем первом письме 1747 года Франклин описал «удивительный эффект заостренных тел, как в *вытягивании*, так и в *выбрасывании* электрического огня». Сначала он представил эксперимент, в котором заземленный и заостренный проводник извлекал электрическую жидкость из другого электризованного проводника, который был изолирован от земли, наши слова в сносках:[22]

> Поместите железное ядро диаметром три или четыре дюйма на горлышко чистой сухой стеклянной бутылки.[23] На тонкой шелковой нити, свисающей с потолка, прямо над горловиной бутылки, подвесьте маленький шарик из пробки, размером с игрушечный стеклянный шарик; нить должна быть такой длины, чтобы пробковый шарик покоился сбоку от ядра. Электризуйте ядро, тогда пробка будет отталкиваться от ядра и удалится приблизительно на расстояние в четыре или пять дюймов в зависимости от количества электричества.
>
> В этом состоянии, если вы поднесете к ядру острое тонкое шило на расстояние в шесть или восемь дюймов, отталкивание мгновенно исчезает, и пробка устремляется к ядру. Тупое тело должно быть поднесено на расстояние в дюйм и вызвать искру, чтобы произвести тот же эффект. Чтобы доказать, что электрический огонь *вытягивается* острием, если вы достанете лезвие шила из деревянной ручки и прикрепите его к палке сургуча, а затем поднесете его на расстояние, указанном выше или ближе, никакого такого эффекта не последует; но проведите одним пальцем по воску, пока вы не коснетесь лезвия, и мяч сразу же полетит к ядру.[24]

Его первое описание заостренного проводника, испускающего электрическую жидкость:[25]

> Чтобы показать, что острые точки будут *сбрасывать*[26], а также *вытягивать* электрический огонь; положите длинную острую иглу на

[22][Fra69, стр. 3-4], [Coh96, стр. 23-24], [Hei99, стр. 327-328] и [MB17].

[23]Эта стеклянная бутылка служит изолятором.

[24]Сургуч – изолятор. В этом эксперименте металлическое лезвие уже не заземлено, поскольку сургуч ведет себя здесь как ручка, изолирующая лезвие от руки Франклина. Лезвие заземляется только тогда, когда оно касается пальца. В этот момент происходит разрядка железного ядра.

[25][Fra69, стр. 5] и [Coh96, стр. 23-24].

[26]Об этой способности острых точек *сбрасывать* электрический огонь, я впервые узнал от моего гениального друга мистера *Томаса Хопкинсона*, уже усопшего, чья добродетель и добросовестность на каждом жизненном пути, будь то в общественной или личной жизни, всегда будут делать его память дорогой для тех, кто знал его и знают, как его ценить.

> ядро, и вы не можете наэлектризовать ядро, чтобы заставить его отталкивать пробковый шар.[27]

В этом эксперименте снова была использована железная стрела, изолированная от земли, поскольку она поддерживалась в стеклянной бутылке. Несмотря на это, невозможно было электризовать стрелу, так как любая приобретенная электрическая жидкость терялась в воздухе через длинную острую иглу.

Он представил аналогичный эксперимент, иллюстрирующий излучение электрической жидкости, а именно:[28]

> Или прикрепите иглу к концу подвешенного ружейного ствола или железного стержня, чтобы она выступала, как маленький штык; и пока она остается там, ствол ружья или стержень не может быть наэлектризован касанием трубки другим его концом, чтобы вызвать искру, поскольку огонь непрерывно утекает через острие.

Еще раз проводящая точка предотвращает накопление зарядов на металлическом стержне.

Предыдущий эксперимент, в котором Франклин извлек электрическую жидкость из изолированного электризованного проводника через другой заостренный и заземленный проводник, вдохновил его. Рассуждая аналогично, он предложил, как проверить идею о том, что молния может иметь аналогичный эффект, только в огромных масштабах. В письме 1750 г., опубликованном в 1751 г., он предложил провести эксперимент с использованием сторожевой будки, чтобы проверить электризацию облаков, наши слова заключены в квадратные скобки:[29]

> 21. Чтобы разрешить вопрос, электризованы ли облака, содержащие молнию, или нет, я бы предложил попробовать эксперимент там, где это можно провести удобно. На вершине какой-нибудь высокой башни или шпиля поместите своего рода сторожевую будку (как на Рис. 9 [см. Рис. 11.15]), достаточно большую, чтобы в нем уместились человек и электрическая подставка [то есть изолирующая подставка]. В середине подставки закрепите железный стержень, который изгибается и выходит наружу через двери, а затем идет вертикально на 20 или 30 футов, сильно заостренный на конце. Если электрическую подставку поддерживать в чистоте и сухости, человек, стоящий на ней, когда такие облака опускаются, может быть наэлектризован и может вызвать искры, поскольку стержень вытягивает огонь из облака на него. Чтобы предотвратить возможную опасность для человека (хотя я думаю, что ее не будет), пусть он встанет на пол своей будки, и время от времени подносит к стержню петлю из проволоки, один конец которой прикреплен к проводам, держа его за восковую ручку [то

[27] Это был эксперимент мистера *Хопкинсона*, выполненный с ожиданием вытянуть более резкую и мощную искру из острия, как от некоего фокуса, и он был удивлен, обнаружив только маленькую искру или вообще ничего.

[28] [Fra69, стр. 5] и [Coh96, стр. 24].

[29] [Fra69, стр. 66], [Coh96, стр. 70], [Hei99, стр. 340-341] и [SP06].

есть за изолирующую ручку]; таким образом, искры, если стержень наэлектризован, будут ударять от стержня к проводу, и не будут влиять на него.



Рис. 11.15: Предложенный Франклином эксперимент с караульной будкой.

Франклин не проводил этот эксперимент. Впервые он был реализован в мае 1752 года во французском городе Марли по мотивам письма Франклина. Его выполнил французский переводчик его книги Т. Ф. Д'Алибард (1709-1778). Описание эксперимента было опубликовано вскоре после его проведения, наши слова в квадратных скобках:[30]

> Для этой цели м-р Д'Алибард выбрал сад, расположенный в Марли, где он положил на электрическое тело [то есть на изолятор] остроконечный стержень из железа высотой 40 футов. 10 мая, в 2 часа 20 минут пополудни, над местом, где стоял стержень, прошло бурное облако, те, кому было поручено наблюдать за ним, приблизились и вытянули из него искры огня, наблюдая те же эффекты, как в обычных электрических экспериментах.
>
> Г-н де Лор, ободренный успехом этого эксперимента, решил повторить его в своем доме на Эстрападе в Париже. Он установил железную стойку высотой 99 футов, на основании из смолы [изолятор], площадью в два квадратных фута и 3 дюйма толщиной. 18 мая, между 4 и 5 днями, когда над стойкой прошло грозовое облако, где оно оставалось полчаса, он вытянул искры из стойки. Эти искры были похожи на искры из ружья, когда, в электрических экспериментах шар только потирали подушкой [электрического генератора на основе трения], и они производили тот же шум, тот же огонь и тот же треск. Самые сильные искры были вытянуты на расстоянии 9 линий, когда дождь, смешанный с небольшим градом, выпал из облака без грома или молнии; это облако, по всей видимости, лишь следствие шторма, случившегося в другом месте.

[30][Fra69, стр. 107], [Coh96, стр. 127-130] и [Hei99, стр. 349-351].

Д’Алибард включил иллюстрацию опыта Марли во второе издание французского перевода книги Франклина, Рис. 11.16. Основным аспектом, на который следует обратить внимание в этом эксперименте, является то, что проводящий железный стержень был электрически изолирован от земли. Эта изоляция обеспечивалась шелковыми шнурами, связывающими стержень, а также пустыми стеклянными бутылками вина, расположенными между небольшой скамейкой и деревянной доской, на которой покоился нижний конец стержня.

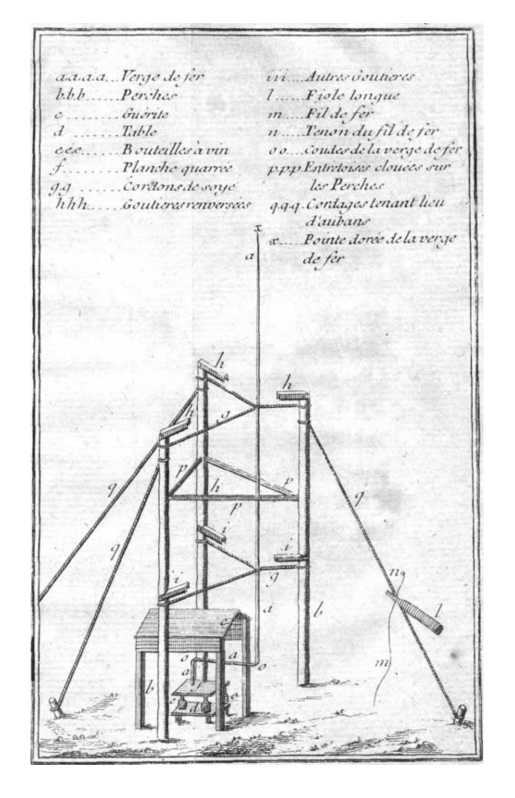


Рис. 11.16: Железный пруток, изолированный от земли.

Из-за силы точек, когда было высокое напряжение между наэлектризованным облаком и железным бруском, воздух вблизи верхнего конца стержня вел себя как проводник. Изолированный проводящий стержень собрал небольшую часть электричества облака. Когда заземленный проводник был поднесен близко к стержню, возникли искры. Эти искры обладали теми же свойствами, что и обычные разряды, полученные в электростатических экспериментах. Эти эксперименты были первыми, которые подтвердили идентичность молнии с электричеством. Некоторые ранние ученые, такие как Стивен Грей, уже представили эту гипотезу, но Франклин был первым, кто предложил конкретный эксперимент для проверки этого предположения. Д’Алибард сделал свой эксперимент под непосредственным влиянием

предсказания Франклина. Подобные эксперименты вскоре были проведены в нескольких странах с использованием проводящих стержней, изолированных от земли.

Эксперименты 11.1, 11.2 и 11.8 похожи на эксперимент Марли, хотя и в гораздо меньших масштабах. Мы не производили искры в этих экспериментах. Однако электризация электроскопа и ориентация версориума испытательным проводом указывают на некоторые эффекты, которые имеют место в изолированном проводнике, один из концов которого находится рядом с другим наэлектризованным телом.

Очевидно, что при проведении экспериментов, подобных экспериментам Марли на открытом воздухе, существует огромная опасность с использованием проводящих стержней, изолированных от земли. В 1753 году русский ученый немецкого происхождения Г. В. Рихман (1711-1753) умер в Санкт-Петербурге от внезапного разряда изолированного стержня во время проведения подобных экспериментов в грозу.[31]

В 1752 году Франклин также предложил провести эксперимент с воздушным змеем для проверки электричества облаков. Подобные эксперименты вскоре были проведены рядом ученых.[32]

Франклин был полностью уверен в идентичности молнии и обычных искр, даже до того, как эта гипотеза была подтверждена в 1752 году экспериментом Марли. В письме 1750 года на имя своего друга Питера Коллинсона (1694-1768) и опубликованном вскоре после этого он предложил построить молниеотводы в качестве средства защиты зданий от электрических разрядов. Существует большая разница между защитными молниеотводами и испытательными стержнями, как описано в разделах 11.3 и 11.4. Молниеотводы заземлены, а испытательные стержни изолированы от Земли. Испытательные стержни могут быть использованы для сбора небольшого количества электричества из облаков или из атмосферы. Молниеотводы предназначены не для сбора электроэнергии, а для защиты зданий. Первое предложение Франклина о защитном громоотводе:[33]

> ... а не может ли знание этой силы точек использовано людьми для сохранении домов, церквей, кораблей и т. д. от удара молнии, закрепив на самых высоких частях этих строений, вертикальные железные стержни, заостренные, как игла, и позолоченные, чтобы предотвратить ржавление, а от подножия этих стержней спуская проволоку за пределы здания в землю или вокруг одного из кожухов корабля и вниз по его стороне, пока она не достигнет воды? Разве эти остроконечные прутья не могли бы незаметно вытянуть электрический огонь из облака, пока он не приблизился достаточно близко, чтобы нанести удар, и тем самым обезопасить нас от этого самого внезапного и ужасного зла?

Эксперимент 11.7 иллюстрирует в небольшом масштабе рабочий механизм громоотвода. Электризованный электроскоп разряжается через заземн-

[31] [Coh96, стр. 5-6, 84-85, 113, 135 и 157], [Hei99, стр. 352, 390, 391 и 460] и [Lom17].
[32] [Coh96, стр. 5, 28, 67-70, 97, 125 и 130], [Hei99, стр. 351] и [SP06].
[33] [Fra69, стр. 65-66] и [Coh96, стр. 83].

ленный провод рядом с ним. Разряд не влияет на соседний дом, который изолирован от провода.

Первые молниеотводы были построены в Европе и Северной Америке в 1752 году, вскоре после эксперимента Марли.[34] Изобретение громоотвода принесло большую известность Франклину, мотивировало изучение атмосферного электричества не только в штормовую погоду, но и в сухую погоду, будучи одним из первых практических приложений исследований в области электричества в массовом масштабе.

11.8 Применение силы острых точек

Сила острых точек применяется во многих ситуациях. Некоторые примеры:

- В этой книге сила точек использовалась каждый раз, когда электроскоп заряжался натертой соломкой царапанием края картона. Мы получаем более эффективную электризацию, проведя соломой по границе картона, чем по ее плоским частям. Ведь граница острее, чем тело картонного прямоугольника. Во время процесса соскабливания перенос электризованных частиц может происходить не только во время контакта между натертой соломкой и картоном, но также когда соломка и картон находятся очень близко друг к другу, без контакта. В этой последней ситуации электризация происходит, когда воздух между острой границей и наэлектризованной соломкой становится ионизированным. Ионизированный воздух ведет себя как проводник, облегчая обмен наэлектризованных частиц.[35]

- Молниеотводы.

- Важное применение имеет место в полевых эмиссионных микроскопах – устройстве, изобретенном в 1936 году физиком Эрвином Вильгельмом Мюллером (1911-1977).

- Используется в электростатических двигателях и в явлениях, связанных с так называемым *электрическим ветром*.[36]

- В фотокопировальных машинах.

- В генераторах Ван де Граафа.

- В атомно-силовых микроскопах.

- и т. д.

[34] [Coh96, стр. 29, 67, 74, 82-83, 91 и 109].
[35] [FM91, стр. 61].
[36] [Jef71b], [Jef71a], [JW71] и [Jef73] .

Глава 12

Лейденская банка и конденсаторы

12.1 Сборка конденсатора

В этом разделе показано, как собрать очень важное электрическое устройство, называемое *конденсатором*. Он хранит заряды и электроэнергию. Первое устройство такого рода, так называемая лейденская банка, было построено в 1745 году и обсуждается в разделе 12.5.

Конденсатор представляет собой устройство, состоящее по сути из двух проводников, разделенных изолятором. Обычно изолятор тонкий, а проводники имеют параллельные поверхности, практически наложенные друг на друга. Конденсатор может иметь разные формы: параллельные пластины, цилиндрические поверхности, форму бутылки или банки и т. д. Перед началом сборки проверьте, действительно ли материал, который будет использоваться в качестве изолятора, ведет себя как изолятор. Этот тест очень важен. Для этого используйте процедуру, указанную на Рис. 3.4. Если этот материал не разряжает наэлектризованный электроскоп при прикосновении к нему в течение примерно 30 секунд, то его можно считать хорошим изолятором. Отныне мы будем использовать в качестве изоляторов посуду, бутылки и банки из пластика или пенопласта.

Простейшим конденсатором является конденсатор с параллельными пластинами. Он был изобретен людьми, связанными с Бенджамином Уилсоном (1721-1788), и был популяризирован Бенджамином Франклином.[1] В качестве изолятора Франклин использовал стеклянную пластину. В этой книге изолятором будет служить жесткая пластиковая пластинка, похожая на блюдо для вечеринки по случаю дня рождения, или тонкая пластина из пенопласта. Прямоугольник (или диск) из алюминиевой фольги должен быть приклеен с каждой стороны пластикового прямоугольника (или пластикового диска). Вырезки из проводящей фольги должны быть немного меньше

[1] [Hei99, стр. 317, примечание 31 и стр. 333-334, примечание 29].

пластиковой и не должны касаться друг друга, Рис. 12.1.

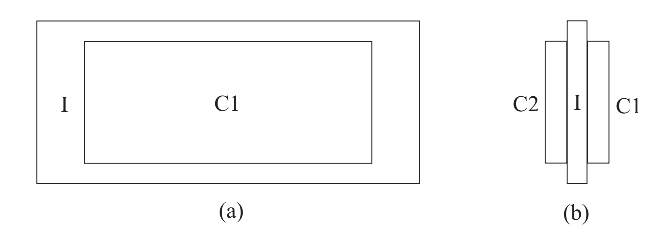


Рис. 12.1: (a) Прямоугольный конденсатор с параллельными пластинами, вид сверху: проводник $C1$ над изолятором I. Под изолятором есть другой проводник $C2$ (не показан на левом рисунке). (b) Вид системы в профиль.

Очень распространенное устройство, обычно называемое лейденской банкой, можно построить из пластиковой бутылки для воды на 200 или 300 мл.[2] На внешней стороне бутылки надо приклеить полосу из алюминиевой фольги, покрывающую примерно три четверти боковой поверхности и совершающую полный оборот вокруг бутылки. Сделайте отверстие в центре пластикового колпачка. Пропустите через это отверстие металлическую проволоку, гвоздь или длинный винт. В идеале, винт должен иметь закругленную головку над колпачком, чтобы предотвратить утечку через острие, когда система электризована. Головка может быть сферической, как металлический шар или как крючок. Внутренним проводником может служить обычная вода из под крана. Или же банку можно заполнить алюминиевой фольгой или стальной ватой. Металлическая проволока, гвоздь или винт должны проникать в воду, алюминиевую фольгу или стальную вату, Рис. 12.2.

Многие другие виды конденсаторов могут быть изготовлены аналогичным образом. Несколько примеров:[3] (а) Использование пластиковых стаканчиков для йогурта с алюминиевой фольгой снаружи. Стаканчик наполнен алюминиевой фольгой. (б) Использование маленьких пластиковых цилиндриков (в которых, например, продают витамин С или зубной флосс). Алюминиевая фольга приклеена снаружи, внутри стальная вата. (в) Пластиковая соломка с алюминиевой фольгой внутри и снаружи, и т. д. Внутренний проводник соединен с внешним миром гвоздем, металлическим проводом, кронштейном или скрепкой для бумаг, проходящими через центр пластиковой крышки или колпачка.

Конденсатор – это устройство, которое накапливает электрический заряд и энергию. Мы можем ввести следующие определения:

[2] [MF].

[3] [FM91, стр. 76-83], [Ferb, Garrafa de Leyden, p. 31] и [Ferc, стр. 73-79].

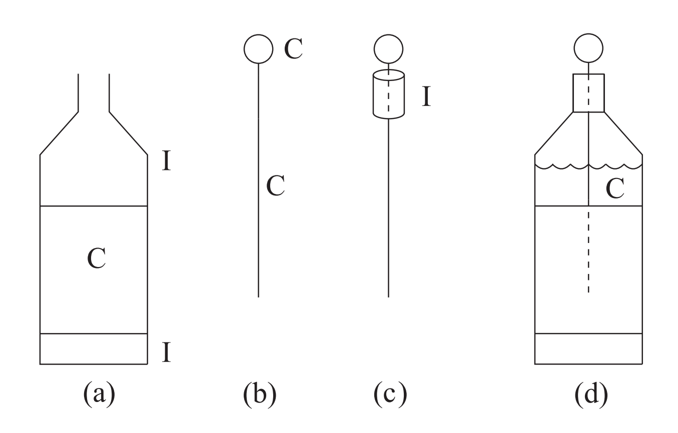


Рис. 12.2: (a) Изолирующая пластиковая бутылка I, окруженная проводящей полосой C на внешней стороне. (b) Проводящий винт C с закругленной головкой. (c) Винт, проходящий через отверстие в центре изолирующего колпачка I. (d) Собранный конденсатор, заполненный проводящим материалом C (вода, алюминиевая фольга или стальная вата).

Определение 12.1

Говорят, что конденсатор *заряжен* или *электризован*, когда имеется электрический заряд $Q \neq 0$ на внутреннем проводнике и электрический заряд $-Q$ на внешнем проводнике. Конденсатор *разряжен*, когда на внутреннем и на внешнем проводниках нет зарядов, то есть когда $Q = -Q = 0$.

В первой ситуации $Q \neq 0$, а во второй ситуации $Q = 0$. В обеих ситуациях полный заряд всей системы равен нулю, $Q + (-Q) = 0$, независимо от того, заряжен конденсатор ($Q \neq 0$) или разряжен ($Q = 0$). Разница между этими двумя ситуациями заключается в том, что когда конденсатор заряжается, в системе накапливается электрическая энергия, которая может произвести множество эффектов (искры, удары током и т. д.). Поскольку в обеих ситуациях нет суммарного заряда, более уместно сказать, что конденсатор *электрически поляризован* в первой ситуации. Однако, поскольку обычно говорят, что конденсатор *электрически заряжен* в первой ситуации, мы будем придерживаться этой традиции. В любом случае следует помнить, что в обеих ситуациях нет суммарного заряда в системе в целом, даже если говорят, что конденсатор заряжается.

12.1.1 Не используйте стеклянную бутылку в качестве изолятора между внутренним и внешним проводниками.

Здесь следует еще раз подчеркнуть, что большинство видов современных стекол ведут себя как проводники в обычных экспериментах по электроста-

тике, раздел 4.3. Мы знаем случаи, когда люди пытались изготовить лейденские банки из стеклянных бутылок и не смогли воспроизвести некоторые простые эксперименты. Выражение "банка"предполагает стеклянную бутылку. Многие люди считают, что стекло, дерево и вода являются изоляторами, так как в учебниках приводят их диэлектрические постоянные. Однако большинство современных материалов из стекла или дерева ведут себя как проводники. Если мы используем проводящую стеклянную бутылку для изготовления лейденской банки, она не будет накапливать противоположные заряды на своих внутренних и внешних частях. Поэтому эксперименты, выполненные с этими проводящими бутылками, не будут работать, см. также раздел 6.3.

Чтобы использовать стеклянную бутылку для изготовления конденсатора или лейденской банки, мы должны сначала проверить ее изолирующее поведение. В этих устройствах могут использоваться только специальные виды стекла, которые ведут себя как хорошие изоляторы. Изолирующее поведение любого материала можно проверить с помощью простого электроскопа, раздел 3.1, эксперимент 3.3, Рис. 3.4.

12.2 Эксперименты с конденсатором

Эксперимент 12.1 - *Зарядка и разрядка конденсатора*

Используйте небольшой цилиндрический конденсатор, изготовленный из пластикового цилиндрика, например, из под зубочистки, высотой около 5 см и диаметром 3 см. Снаружи приклеена полоса алюминиевой фольги, а цилиндр заполнен стальной ватой, Рис. 12.3 (a). Эта стальная вата должна соприкасаться с гвоздем, проходящим через центр пластиковой крышки, с головкой гвоздя снаружи, Рис. 12.3 (b).

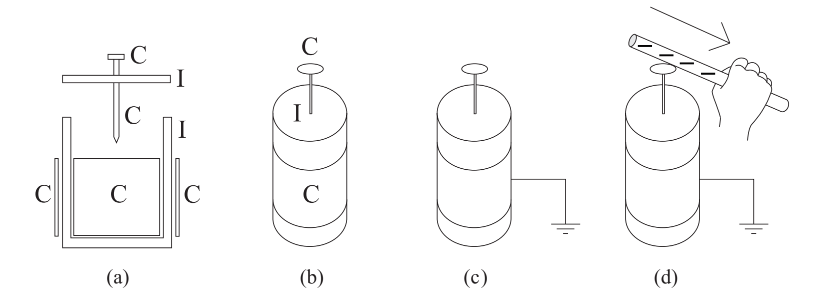


Рис. 12.3: (a) Цилиндрический конденсатор, изготовленный из проводников C и изоляторов I. (b) Собранная система. (c) Заземленный конденсатор. (d) Зарядка шляпки гвоздя соломкой.

Электризуйте соломку или акриловую линейку, втирая ее в волосы, салфетку или хлопчатобумажную ткань. Заземлите конденсатор. Для этого держите цилиндр, прикасаясь к внешней полосе алюминиевой фольги, Рис.

12.3 (c). Проведите другой рукой натертую соломку по головке гвоздя, Рис. 12.3 (d). Эту процедуру следует повторить несколько раз, заряжая конденсатор.

С этого момента предположим, что конденсатор заряжен или наэлектризован. Держите алюминиевую фольгу цилиндра рукой. Проводящая рука представлена буквой C на Рис. 12.4 (a). Поднесите палец к головке гвоздя. Когда они очень близки друг к другу, мы испытываем небольшой шок. Иногда можно увидеть искру в темной комнате и услышать щелчок во время разряда, Рис. 12.4 (b).

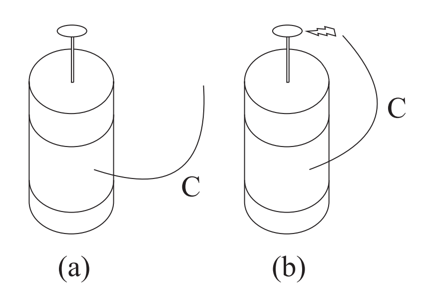


Рис. 12.4: (a) Заряженный конденсатор с проводящей рукой C, касающейся полоски из алюминиевой фольги. (b) Когда палец приближается к головке гвоздя, проскакивает искра.

Эксперимент 12.2 - *Разрядка конденсатора без электрического шока*

Эксперимент 12.1 можно выполнить, не подвергаясь при этом удару.[4] Один конец проводника должен быть закреплен на полосе алюминиевой фольги. Другие части проводника должны находиться далеко от головки гвоздя. Этот проводник может быть медным проводом, бумажной скрепкой или металлическим кронштейном, как на Рис. 12.5 (b).

С этого момента предположим, что конденсатор заряжен. Держите акриловую линейку рукой, чтобы ее свободный конец касался проводника, соединенного с полосой алюминиевой фольги. Поднесите головку скрепки для бумаг к головке гвоздя. Когда они находятся очень близко друг к другу, возникает искра, и мы не чувствуем никакого шока, Рис. 12.5 (c).

Эксперимент 12.3 - *Зарядка конденсатора с помощью электрофора*

Эксперимент 12.1 легче провести с использованием электрофора для зарядки конденсатора. Удерживая цилиндр за внешнюю полосу алюминиевой фольги, несколько раз прикоснитесь к головке гвоздя с помощью электризованного сборщика заряда электрофора. Когда система хорошо заряжена, мы можем почувствовать шок, коснувшись одновременно одной рукой полоску алюминиевой фольги и головку гвоздя.

[4] [Ferc, стр. 73].

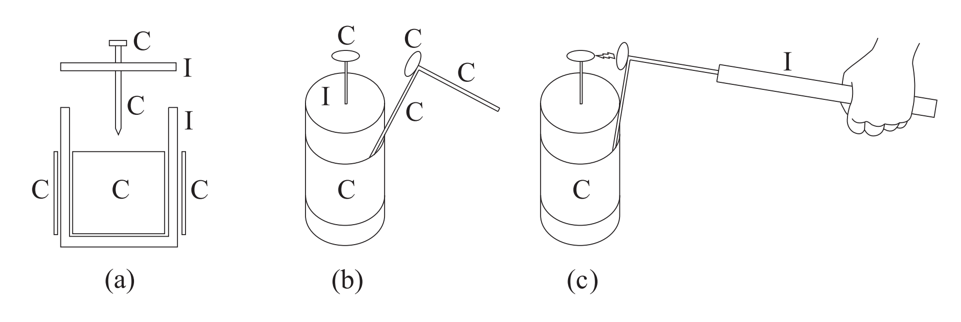


Рис. 12.5: (a) Цилиндрический конденсатор из проводников C и изоляторов I. (b) Смонтированная система с бумажной скрепкой, соединенной с полосой из алюминиевой фольги. Головка бумажной скрепки находится далеко от головки гвоздя. (c) Искра возникает при приближении головки бумажной скрепки к головке гвоздя.

Эксперимент 12.4 - *Зарядка и разрядка лейденской банки*

Этот эксперимент показывает, как получить более масштабные эффекты с большей интенсивностью, используя лейденскую банку, приготовленную из пластиковой бутылки объемом 200 или 300 мл. Используйте электрофор для зарядки этого конденсатора. Сборщик заряда этого электрофора будет представлять собой сковородку для пиццы диаметром 30 см с изолирующей ручкой в центре. Электризуйте сборщик заряда электрофора. Он представлен наэлектризованным металлическим диском рядом с лейденской банкой на Рис. 12.6 (a). Этим коллектором заряда следует манипулировать только через его изолирующую ручку. Держите внешнюю полосу алюминиевой фольги рукой, заземляя ее, как показано на рисунке.

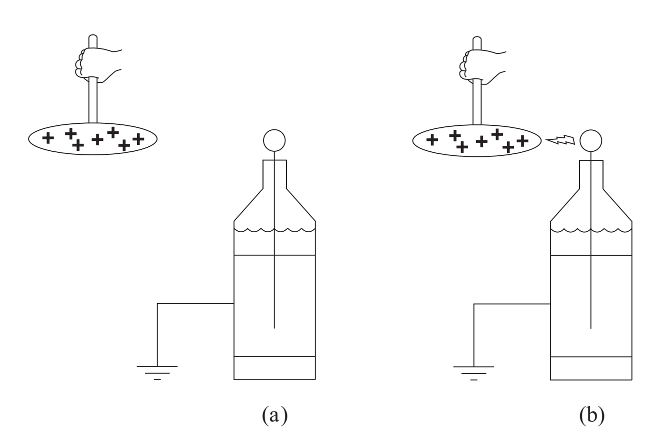


Рис. 12.6: (a) Разряженная и заземленная лейденская банка. Вдали от нее наэлектризованный электрофор. (b) Вы можете зарядить конденсатор, поднося электрофор очень близко к головке шурупа.

Несколько раз электризуйте лейденскую банку, используя этот коллектор заряда. Для этого нет необходимости в контакте между коллектором заряда и закругленной головкой винта в бутылке. Обычно, когда они подходят очень близко друг к другу, можно услышать треск, сопровождаемый искрой, особенно когда край сковородки для пиццы приближается к головке винта, Рис. 12.6 (b). Эту процедуру зарядки следует повторить 5 или 10 раз.

Теперь предположим, что конденсатор хорошо заряжен, и в одном из проводников достаточно большое количество положительного электричества. Он может быть заземлен или изолирован от Земли. Прикоснитесь пальцем к внешней полоске алюминиевой фольги, заземляя ее, Рис. 12.6 (a). Тогда мы можем почувствовать сильный шок, если одновременно прикоснуться одним пальцем к полоске алюминиевой фольги бутылки, а другим пальцем – к головке винта. Иногда этот последний контакт не является необходимым. Достаточно приблизить палец очень близко к головке винта, чтобы почувствовать удар и увидеть искру, Рис. 12.7 (b).

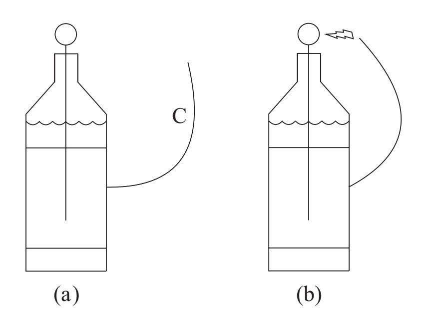


Рис. 12.7: (a) Заряженная лейденская банка, удерживаемая в руке за проводящую алюминиевую фольгу. (b) Когда палец приближается к головке винта, возникает искра, разряжая конденсатор.

Рис. 12.8 (a) показывает, как получить искру без ощущения удара током. Лейденская банка изначально заряжена. Рассмотрим гибкий медный провод длиной 20 или 30 см. Обмотайте одну часть вокруг изолирующей акриловой линейки. Обмотайте другую часть вокруг другой акриловой линейки. Свободные концы проволоки должны выходить за пределы линейки.

Держите каждую линейку рукой. Коснитесь одним свободным концом медного провода полоску алюминиевой фольги. Когда другой свободный конец провода приближается к головке винта, возникает искра и щелчок, Рис. 12.8 (b). Мы не испытываем никакого шока в процессе разряда.

Эксперимент 12.5 - *Зарядка цилиндрического конденсатора через его боковую проводящую полосу*

Конденсаторы экспериментов 12.1 и 12.3 также можно зарядить, соскабливая натертую соломку по полоске алюминиевой фольги, приклеенной на

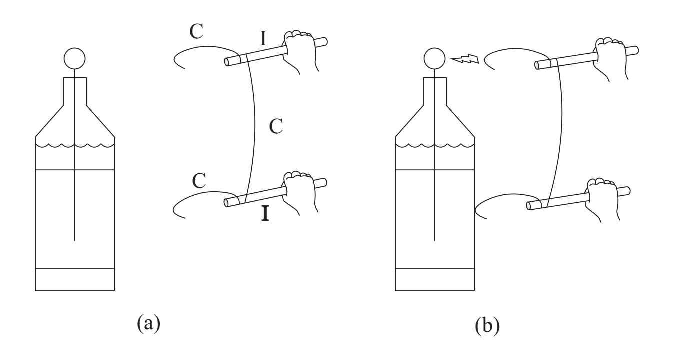


Рис. 12.8: (a) Заряженная лейденская банка. Одна медная проволока C намотана вокруг двух акриловых линеек I. (b) Разрядите банку, соединив ее внешний провод со свободным концом медного провода и поднося другой конец провода очень близко к головке винта.

внешней стороне цилиндра. Чтобы получить достаточно большое количество электризации, конденсатор должен быть заземлен своим внутренним проводником. Для этого прикоснитесь пальцем к гвоздю, Рис. 12.9 (a). Пока конденсатор заземлен, проведите натертой акриловой линейкой по внешней полосе алюминиевой фольги конденсатора, Рис. 12.9 (b). Этот процесс следует повторить примерно 5 или 10 раз.

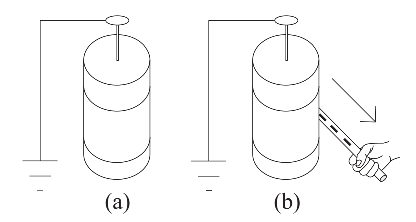


Рис. 12.9: (a) Разряженный конденсатор заземлен своим внутренним проводником. (b) Зарядите конденсатор, когда он заземлен, соскабливая потертой акриловой линейкой полосу алюминиевой фольги на его внешней стороне.

С этого момента, предположим, что этот конденсатор имеет достаточно большое количество электризации. Прикоснитесь пальцем к его внутреннему проводнику, Рис. 12.10 (a). Когда другой палец приближается к полосе алюминиевой фольги, мы чувствуем шок и иногда наблюдаем искру, Рис. 12.10 (b).

Конденсатор также можно заряжать через его внешнюю полоску с использованием электрофора. Первоначально конденсатор должен быть заземлен через его внутренний проводник. Для этого достаточно коснуться пальцем головки гвоздя. Пока он заземлен, поднесите коллектор заряда электрофора к внешней полосе алюминиевой фольги. Когда край наэлектризованного сборщика заряда находится очень близко к внешней полосе,

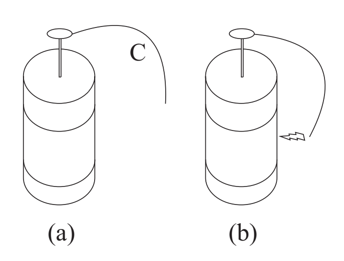


Рис. 12.10: (a) Заряженный конденсатор с проводником C, касающимся гвоздя. (b) Когда свободный конец этого проводника приближается к полосе алюминиевой фольги, возникает искра, мы чувствуем удар, и конденсатор разряжается.

возникает искра. Эту процедуру зарядки следует повторить 5 или 10 раз.

Предположим, что конденсатор был наэлектризован. Он легко разряжается, когда та же рука касается головки ногтя и полоски алюминиевой фольги.

Эксперимент 12.6 - *Заземление любого из двух проводников наэлектризованного конденсатора, не разряжая его*

Зарядите конденсаторы, как в экспериментах 12.1 и 12.3. Для этого конденсаторы должны быть заземлены в ходе зарядки. Снимите руку с внешней полосы алюминиевой фольги. Электризованный конденсатор должен лежать на столе. Нижняя часть конденсаторов, использованных в этой книге, выполнена из пластика, как на рисунках 12.2 и 12.3 (b). Поэтому, когда эти заряженные конденсаторы лежат на столе, они изолированы от земли. Когда на нижней поверхности цилиндра есть какая-либо часть внешней полосы алюминиевой фольги, конденсатор должен опираться на изолятор (например, на пластину из пенопласта), прежде чем продолжить этот эксперимент.

Когда палец касается головки гвоздя или винта этого заряженного и изолированного конденсатора, мы не испытываем никакого удара. Это важное наблюдение. Заряженный конденсатор, изолированный от земли, не разряжается, когда палец касается его внутреннего проводника. То есть он не разряжается при заземлении своего внутреннего проводника. Уберите палец с гвоздя или винта. Теперь мы можем коснуться только его внешней полосы из алюминиевой фольги. Снова мы не чувствуем никакого удара от заряженного конденсатора. Это еще одно важное наблюдение. Заряженный конденсатор, изолированный от земли, не разряжается, когда палец касается его внешнего проводника. То есть он не разряжается при заземлении своего внешнего проводника.

Однако, когда мы коснемся одновременно головки ногтя и полоски алюминиевой фольги, мы почувствуем шок.

Эксперимент 12.7 - *Сравнение зарядов, полученных заземленным и незаземленным конденсаторами*

В этом эксперименте электризуйте конденсатор, не заземляя его во время процесса зарядки. Начните с разряженной лейденской банки, лежащей на столе. Электризуйте, используя коллектор заряда электрофора. Предположим, что этот коллектор заряда представляет собой проводящий диск с изолирующей ручкой в центре. Электризуйте этот коллектор заряда и держите его только за его ручку. Край его наэлектризованного диска затем подносится к головке гвоздя или винту конденсатора. Искра может проскочить, когда они находятся очень близко друг к другу.

Сравните искру, полученную в этом эксперименте, с искрой, возникшей в экспериментах 12.3 и 12.4, где сосуд был заземлен. Можно заметить, что теперь искра и щелчок обладают меньшей интенсивностью, чем искра и щелчок в случае с заземленной банкой.

Поднесите пять раз наэлектризованный диск зарядного коллектора электрофора к головке гвоздя изолированного конденсатора. После этого процесса зарядки, разрядите его, одновременно касаясь полоски алюминиевой фольги и головки гвоздя, чувствуя удар во время разряда. Однако этот шок меньше, чем шок, вызванный той же процедурой с заземленным конденсатором. Предположим, что конденсатор изначально разряжен и заземлен через полосу алюминиевой фольги. Пять раз поднесите наэлектризованный диск зарядного коллектора электрофора близко к головке гвоздя этого заземленного конденсатора. После этого процесса зарядки разрядите его, одновременно прикоснувшись к полоске алюминиевой фольги и головке гвоздя, чувствуя сильный удар во время этого разряда.

Повторите эту процедуру зарядки с изолированным конденсатором. То есть пять раз поднесите наэлектризованный диск коллектора заряда электрофора близко к головке гвоздя изолированного конденсатора. Теперь заземлите этот конденсатор через гвоздь, касаясь пальцем его головы. Мы ощущаем только небольшой удар и конденсатор полностью разряжается.

Повторите эту процедуру зарядки еще раз с изолированным конденсатором. Поместите тыльную сторону руки рядом с полоской алюминиевой фольги этого заряженного и изолированного конденсатора. Иногда мы чувствуем, как волосы на руке притягиваются этой полосой. Когда мы прикасаемся к полосе, мы испытываем небольшой шок. Однако банка разряжается не полностью при этой процедуре заземления (здесь заземление происходит через внешнюю полосу алюминиевой фольги). Чтобы полностью разрядить этот наэлектризованный конденсатор, мы должны одновременно дотронуться до его полоски и головки ногтя, чувствуя небольшой удар во время этого разряда.

12.3 Рабочий механизм конденсатора

В этом разделе описываются эксперименты, которые опираются на тот факт, что между проводниками конденсатора имеется изолятор. В идеале этот изолятор предотвращает обмен наэлектризованных частиц между внутренним и внешним проводниками лейденской банки.

Рассмотрим ситуацию, где банка заряжается, когда ее внешний проводник заземлен, то есть когда мы держим ее полоску алюминиевой фольги рукой. Предположим, мы соскоблили положительно наэлектризованной соломкой головку винта. Или же поднесли коллектор заряда, положительно электризованный, близко к головке винта, производя тем самым искру. В обоих сценариях внутренний проводник конденсатора становится положительно электризованным. Поскольку внешняя полоса заземлена, происходит обмен электризованных частиц с землей. Эта полоска становится отрицательно наэлектризованной. Положительные заряды внутреннего проводника распределены по существу вдоль части его поверхности, которая близка к внешнему проводнику. Аналогично, отрицательные заряды внешнего проводника распределены по существу вдоль части его поверхности, которая близка к внутреннему проводнику.

Рис. 12.11 иллюстрирует различные по форме электризованные конденсаторы. Их проводники обозначены $C1$ и $C2$, а промежуточный изолятор представлен буквой I.

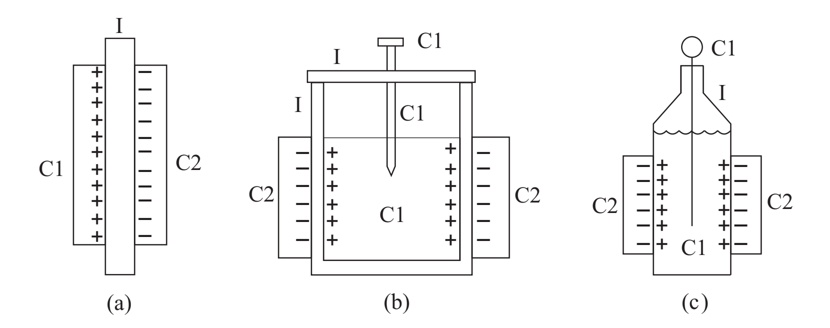


Рис. 12.11: Заряженные конденсаторы. (a) Параллельные пластины. (b) Цилиндрический конденсатор. (c) Лейденская банка

На Рис. 12.11 (a) показан плоскопараллельный конденсатор в профиль, на Рис. 12.11 (b) показан цилиндрический конденсатор, а на Рис. 12.11 (c) представена лейденская банка. Здесь мы несколько преувеличили толщину внешних полос алюминиевой фольги, чтобы подчеркнуть тот факт, что их заряды, по существу, расположены вдоль их внутренних поверхностей. Эти рисунки дают только качественное представление о распределении зарядов.

Когда мы заземляем только один из проводников заряженной лейденской банки, он не разряжается. Противоположные заряды остаются на своих местах из-за притяжения между частицами разного знака.

С другой стороны, конденсатор разряжается, когда оба проводника $C1$ и $C2$ подключаются к третьему проводнику.

12.4 Грей, Дюфе и электризация воды

Стивен Грей (1666-1736) открыл проводники и изоляторы в 1729 году, опубликовав свои выводы в 1731 году в одной из самых важных статей в истории электричества.[5] В томе 1 этой книги представлено подробное описание работы Грея.[6] В своих экспериментах он описал следующие изолирующие вещества: шелковую нить, лески из конского волоса, лепешки из смолы, нагретое стекло, лепешки из пчелиного воска, сера и шеллак. Его электрический генератор представлял собой просто трубку из кремниевого стекла, то есть тяжелое блестящее стекло, содержащее оксид свинца. Он потирал свою трубку голой рукой. Он держал натертую стеклянную трубку в руке во время экспериментов. Поскольку трубка не разряжалась через контакт с руками, этот факт означает, что трубка вела себя как очень хороший изолятор, в отличие от большинства современных стекол, встречающихся в быту. Кроме того, его стеклянная трубка приобретала большую плотность поверхностного заряда. Он передавал притягивающую силу электризованной трубки различным проводникам. Чтобы получить этот эффект, проводник был электрически изолирован от земли, опираясь на изоляционные материалы или вися на шелковых нитях. Когда он поднес электризованную трубку близко к одному концу этого изолированного проводника, он заметил, что другой конец проводника приобрел свойство притягивать легкие тела, расположенные рядом с ним. Таким образом, ему удалось передать эту способность притягивать металлам, дереву, человеческому организму и многим другим проводящим веществам. Ему удалось также передать это свойство воде, наши слова в квадратных скобках:[7]

> 23 марта [1730 г.] я растворил мыло в воде Темзы, затем подвесил курительную трубку на волосяной нити [изолированная нить, вероятно, сделанная из шелка или конского волоса] так, чтобы она висела почти горизонтально, с устьем чаши вниз; затем предварительно окунув его в мыльный раствор, раздув мыльный пузырек, положил листочек из латуни на подставку под ним, потер [стеклянную] трубку, и пузырек притянул латунь, когда трубку держал возле подвесной нити. Затем я повторил эксперимент с другим пузырем, держа трубку возле маленького конца трубы, и теперь притяжение стало намного больше, латунный листик притягивался к высоте [sic] около двух дюймов.

Рис. 12.12 (a) иллюстрирует этот эксперимент. Он показывает, что мыльная вода ведет себя как проводник. Рис. 12.12 (b) дает качественное представление о распределении зарядов в эксперименте Грея.

Грею удалось передать притягивающую силу нескольким проводникам, заставляя их притягивать расположенные рядом легкие тела. Изоляторы, с другой стороны, не могли притягивать легкие тела с той же силой, когда к ним подносили натертую стеклянную трубку. Пусть два тела одинаковой формы и размера, проводник и изолятор, изолированы от земли и

[5] [Graf], [Bos11, Capítulo 6] и [BAC12, Глава 7, с. 127-169].
[6] Приложение B к [Ass10b] , [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].
[7] [Graf, стр. 38-39], [Bos11, стр. 165-166] и [BAC12, стр. 162-163].

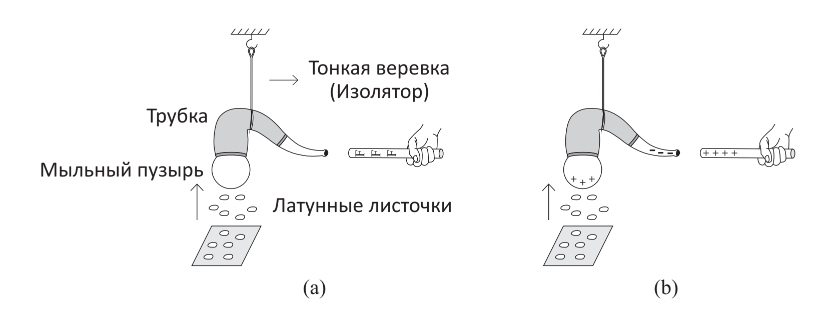


Рис. 12.12: (a) Изолированный пузырь, притягивающий крошечные листочки латуни, когда потертую стеклянную трубку подносят к маленькому концу трубки. (b) Качественное распределение зарядов на трубе, трубке и пузырьке.

расположены далеко друг от друга. Поднесите натертую стеклянную трубку близко к проводнику, поляризуя его. Поднесите натертую стеклянную трубку на такое же расстояние к изолятору, поляризуя его. Наблюдаемая поляризация, полученная проводником, намного больше, чем эффективная поляризация, приобретенная изолятором.[8]

Здесь мы даем современную интерпретацию эксперимента Грея. Трубка и пузырь вели себя как проводники, а нить из волоса – как изолятор. Предположим, стеклянная трубка положительно электризована. Когда он подносится к маленькому концу трубки, в системе трубка-пузырь возникает поляризация зарядов. Удаленный пузырь становится положительно электризованным, в то время как маленький конец трубы становится отрицательно электризованным. Затем наэлектризованный пузырь притягивает легкие кусочки проводящей латуни, расположенные под ним.

В 1731 году Грей электризовал воду с помощью другого процесса. Он закрепил деревянную пластину на изолирующей опоре из стекла. Тарелка была заполнена пресной водой. Затем потертую стеклянную трубку он поднес очень близко к поверхности воды, не касаясь ее. Затем он убрал трубку. Проведя несколько тестов, он подтвердил, что вода была электризована этим процессом. Ниже цитата из его работы, наши слова в сносках:[9]

> I. В предыдущем отчете о моих экспериментах я описал способ передачи притяжения к пузырю мыльной воды; но теперь я обнаружил, что даже *масса воды получает притягивающую, а также отталкивающую силу, при прикладывании к ней возбужденной трубки, так же, как это происходит с твердыми телами.*[10] Для выполнения этого эксперимента я перевернул деревянную тарелку, с отверстием для винта внизу, но не настолько, чтобы пройти сквозь дерево: Она была

[8] См. Разделы 7.3, 7.6, 7.7, 7.9 и 8.3 из [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

[9] [Grab, стр. 227-228], [Bos11, стр. 211-214] и [BAC12, Chapter 8, стр. 172-174], [DF33a, стр. 34-35] и [Hei99, стр. 253].

[10] Курсив в оригинале. Грей обнаружил, что твердый проводник может приобретать притягивающие и отталкивающие свойства, когда к ним подносят натертую стеклянную трубку. Теперь он обнаружил, что те же самые свойства могут быть переданы воде.

прикручена к верхнему концу одного из стоек, которые я упоминал в других экспериментах, другой верх был снят. Блюдо было диаметром около четырех дюймов и глубиной один дюйм. Затем подставку поставил на пирог из канифоли, или на тарелку из стекла, или на полочки из стакана, или из цилиндра, например, которые используются для стаканов для воды. Сначала нужно подогреть стакан,[11] затем блюдо заполнить водой, потереть трубку и задвинуть ее под блюдом и над водой три или четыре раза, не касаясь их.[12] После того, как она была возбуждена, не только блюдо, но вода тоже становится электрической;[13] и, если маленький кусочек нити,[14] или узкая полоска тонкой бумаги, или кусок чистой латуни, обычно называемый мишурой, удерживается над водой в горизонтальном положении, в пределах примерно дюйма или в несколько раз больше, любой из упомянутых тел[15] будут притягиваться к поверхности воды и отталкиваться, но не так часто, как твердыми телами.[16] Если подвесная нить будет удерживаться на некотором расстоянии снаружи этого блюда, оно будет притягиваться и отталкиваться много раз вместе с очень быстрым движением,[17] но не на таком большом расстоянии, как при пустом

[11]При помощи этой процедуры деревянное блюдо было закреплено на изолирующей опоре, а именно, пироге из смолы или подогретом стекле.

[12]Рис. 12.13 иллюстрирует эту процедуру.

[13]Figure 12.14 иллюстрирует, как Грэй мог сделать вывод, что в результате этой процедуры емкость для воды наэлектризовалась.

[14]Возможно, хлопковая или льняная нить. Эти материалы ведут себя как проводники в электростатических экспериментах.

[15]Тела, упомянутые Греем, были [хлопковая] нить, узкая бумажная накладка и кусок чистой меди. Все эти материалы ведут себя как проводники.

[16]Поскольку Грей говорит о притяжении и отталкивании, он, возможно, наблюдал нечто аналогичное механизму ПКО. Если это так, то, вероятно, один конец нити, бумаги или мишуры был прикреплен к изолирующей ручке, а их свободные концы находились над водой в горизонтальном положении.

[17]Грей не уточнил материал своей "подвесной нити". Мы полагаем, что это было похоже на электрический маятник, который он описал в 1720 году [Graa, стр. 107]. То есть, на деревянной палочке была закреплена шелковая нить. Пуховое перо было привязано к свободному концу этой нити. Палка держалась его голыми руками. Хотя в этом эксперименте деревянная палочка ведет себя как проводник, этот аспект не имеет решающего значения. Основные свойства этого маятника: шелковая нить ведет себя как изолятор, а пуховое перо ведет себя как проводник.

Получите последовательность притяжений и отталкиваний с помощью этого электрического маятника. Для этого пуховое перо должно быть расположено между натертой соломкой и заземленным проводником, как описано в эксперименте 4.15 из [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17]. В конкретном эксперименте Грея пуховое перо его электрического маятника удерживалось шелковой нитью, к которой он был привязан, на той же высоте, что и блюдо с электризованной водой. Пуховое перо должно быть расположено между этой наэлектризованной тарелкой и заземленным корпусом. Предположим, что это заземленное тело было одной из рук Грея. Когда маятник был помещен близко к наэлектризованной тарелке, пуховое перо было привлечено тарелкой, коснулось ее и приобрело суммарный заряд того же знака, что и тарелка. После их контакта перо было отброшено блюдом. Затем он коснулся пальца Грея на противоположной стороне. Перо было разряжено этим процессом заземления. Затем его снова привлекло наэлектризованное блюдо, коснулось его, после чего разрядило пальцем. Этот процесс может повторяться много раз, вызывая вибрационное движение притяжения и отталкивания. В принципе, это может происходить много раз, пока емкость для воды не будет полностью разряжена. Рис. 12.14 иллюстрирует этот механизм ПКО.

блюде.

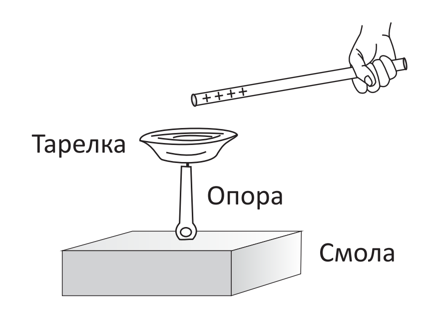


Рис. 12.13: Емкость для воды закреплена на опоре, которая находится на изолирующей лепешке из смолы. Электризованная трубка перемещается над и под тарелкой, не касаясь воды и тарелки.

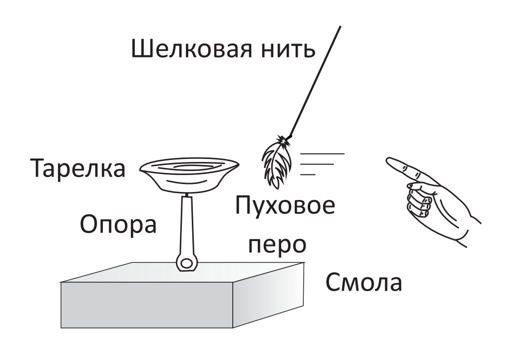


Рис. 12.14: После того, как блюдо электризовано, между пластиной и пальцем помещают проводящее перо, привязанное к изолирующей нити. Перо притягивается пластиной, касается ее, а затем отталкивается. Он наэлектризуется во время контакта с блюдом и разряжается при прикосновении к пальцу. Этот механизм ПКО может повторяться много раз.

Вероятно, опора в этом эксперименте была сделана из дерева. Только кусок смолы и окружающий воздух были изоляторами. Все остальные тела были проводниками, а именно: вода, тарелка и опора. Следовательно, возможно, что стеклянная трубка электризована не только водой, но и всеми проводниками, контактирующими с водой. Вероятно, электризация была получена через искры или небольшие электрические разряды между наэлектризованной стеклянной трубкой и водой. Предположим, что этот процесс электризации состоялся, затем пластина и вода были электризованы зарядом того же знака, что и стеклянная трубка. В более раннем эксперименте наблюдалась поляризация системы труба-пузырь. В настоящем эксперименте, с другой стороны, система проводников получила суммарный заряд, отличный от нуля. Рис. 12.15 показывает, как Грей пришел к выводу, что вода была электризована.

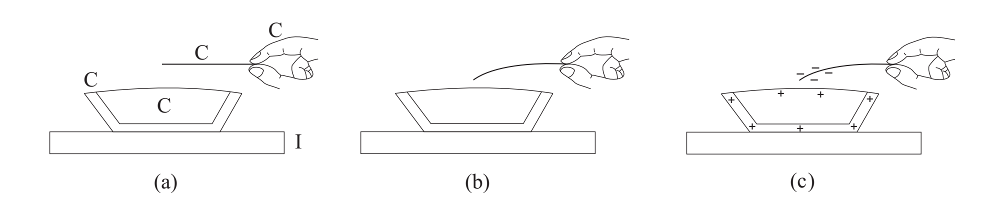


Рис. 12.15: (a) Проводники представлены буквой C, а изолятор представлен I. Нейтральная вода, нет притяжения. (b) Электризованная вода притягивает проводящую полосу при приближении к ней. (c) Распределение зарядов в этом эксперименте.

Тарелка для воды опирается на изоляционный материал I. Рис. 12.15 (a) показывает ситуацию, когда система не электризована. В этом случае горизонтальная полоска бумаги может быть приближена к пластине без притяжения. Затем электризованная стеклянная трубка перемещается над и под водяной пластиной, очень близко к системе, но не касаясь ее. Уберите стеклянную трубку. Рис. 12.15 (b) показывает, что происходит, когда горизонтальная полоса бумаги приближается к системе. Она притягивается электризованной водой. Рис. 12.15 (c) представляет качественное распределение зарядов в этом эксперименте.

В 1733 году Дюфе продолжил эти исследования Грея. Он пришел к выводу, что этот процесс может наэлектризовать большинство изначально нейтральных тел. Нужно было только привести их в контакт или поднести очень близко к другому наэлектризованному телу.[18] Чтобы электризовать изначально нейтральное тело, оно должно быть изолировано от земли. Примером этого процесса электризации служит механизм ПКО, описанный в разделе 4.4, Рис. 4.11.[19] В этом процессе заряд, приобретенный изначально нейтральным телом, имеет тот же знак, что и заряд электризованного изолятора, который соприкасается с ним. Согласно так называемому "*правилу Дюфе*" тело, которое должно быть наэлектризовано этим процессом, должно быть хорошо изолировано, то есть опираться на изолирующую опору достаточной толщины. Он описал этот процесс электризации следующим образом, наши слова в квадратных скобках и в сноске:[20,21]

> Мы видели в первой части этого мемуара,[22] что жидкости могут наэлектризоваться; единственный способ добиться успеха в электризации [жидкостей] с помощью [электризованной] трубки состоит в том, чтобы поместить их в небольшую стеклянную, фарфоровую или фаянсовую банку и поместить банку на восковую или стеклянную опору,

[18][DF33a], [DF33c] и [Hei99, стр. 252-253].

[19]раздел 4.8 в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

[20][DF33c, стр. 84] и [Hei99, стр. 252-253].

[21]Nous avons vû dans la premiére partie de ce Mémoire, que les liqueurs pouvoient devenir électriques; la seule maniére d'y réüssir par l'approche du tuyau, est de les mettre dans un petit vase de verre, de porcelaine ou de fayence, & de poser ce vase sur un guéridon de verre ou de cire d'Espagne, car on le tenteroit en vain sur un de bois ou de métal; [...]

[22]See [DF33a, стр. 33-34].

> использование платформы из дерева или металла было бы напрасно; [...]

Подставка из воска или стекла вела себя здесь как изолятор.

С принятием такой предосторожности, большинство тел могло быть наэлектризовано или контактом или приближением вплотную электризованного изолятора. Следуя этой процедуре, Дюфе преуспел в электризации воды, как это сделал Грей до него. Во-первых, блюдо с водой опиралось на изоляционный материал. Затем он может быть наэлектризован, когда заряженная трубка перемещается над и под тарелкой.

Дюфе также удалось электризовать воду путем контакта. С этой целью он поставил блюдо на изолирующий материал. Проводящая нить была закреплена на стеклянной трубке. Он наэлектризовал трубку, потерев ее о соответствующий материал. В результате электризации трубки нить, соединенная с ней, была поляризована. Затем свободный конец нити был приведен в контакт с изолированной водой. После удаления нити, некоторые тесты показали, что вода стала электризованной. Его описание этого эксперимента с нашими словами в квадратных скобках и в сноске:[23],[24]

> В другом томе *Философских докладов* прошлого года, номер 422,[25] Мистер Грей показал, что вода может быть электризована. Этот эксперимент можно провести следующим образом. Небольшая деревянная écouelle [то есть деревянная миска для супа или каши с двумя ручками], или фарфоровая тарелка, наполняется водой, затем она помещается на одну из этих маленьких пьедесталов, или на очень сухой и немного подогретое блюдо из дерева; потерев эту трубку, нужно приблизить ее к чаше, дважды или трижды пропустив ее под и по бокам, не касаясь ее. Этой процедуры будет достаточно для передачи очень чувствительного электрического свойства [то есть свойства притяжения легких тел] к чаше или блюдцу и к воде внутри нее, эту [электризацию] можно распознать, когда [один] волос или тонкая нить подносят горизонтально близко к поверхности воды, и мы видим это нить приближается к воде, пока она не погрузится в нее. Я преуспел

[23] [DF33a, стр. 34-35] и [Hei99, стр. 253].

[24] Dans un autre endroit des Transactions Philosophiques de l'année derniére, N.^{o} 422, M. Gray fait voir que l'eau peut devenir électrique. Voici de quelle maniére se fait cette expérience. On remplit d'eau une petite écuelle de bois ou une soucoupe de procelaine, on la pose sur un de ces petits guéridons, ou sur un verre à boire bien sec, & un peu chauffé; pour lors ayant frotté ce tube, on l'approche de la soucoupe, le passant par dessus & par les côtés deux ou trois fois, sans néantmoins y toucher, cela suffit pour communiquer une vertu électrique trés-sensible à l'écuelle, ou la soucoupe, & à l'eau qui y est contenuë, ce que l'on reconnoît en approchant un cheveu, ou un fil délié dans une situation horisontale de la surface de l'eau, on voit alors ce fil s'en approcher jusqu'à ce qu'il s'y soit plongé. Cette expérience m'a réussi de la maniére que je viens de la décrire, & avec autant de facilité, de la maniére suivante. J'avois ajusté au bout de mon tuyau un bouchon de liége auquel étoit attaché un bout de corde, le tuyau étant rendu électrique par le frottement, j'ai plongé l'extrémité de la corde dans la soucoupe remplie d'eau, & posée sur un verre chauffé, ce qui a communiqué la vertu à la surface de l'eau, de même que par l'opération précédente, & is est vraisemblable qu'il en seroit de même de toutes les liqueurs, mais is est à observer que cette vertu est moins considérable dans l'eau que dans les corps solides.

[25] See [Grab].

> в этом эксперименте после этой процедуры и с такой же легкостью следующим образом. Я соединил пробку с куском струны [или веревки] на конце моей [стеклянной] трубки, труба была электризована трением, затем я погрузил конец струны в наполненную водой чашу, которая поддерживалась на нагретом куске стекла, эта процедура передала [электрическое] свойство воде, как это произошло с более ранней процедурой, и вполне вероятно, что такая же [электризация] будет иметь место для всех жидкостей, но следует отметить, что это [электрическая] свойство меньше в воде, чем в твердых телах.

Рис. 12.16 иллюстрирует процедуру Дюфе по электризации воды. Его электризованная стеклянная трубка работала как изолятор. Чаша с водой покоилась на другом изоляторе I. Вода, чаша и нить, соединенные с трубкой, вели себя как проводники C в этом эксперименте.

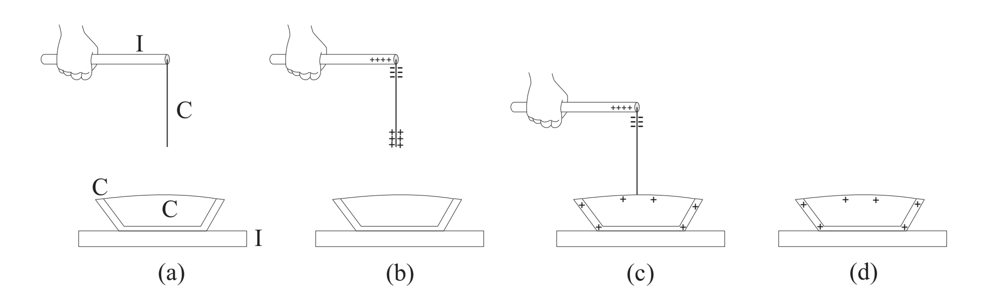


Рис. 12.16: (a) Изоляционная стеклянная трубка I с проводящей струной C, прикрепленной к ее концу. Чаша заполнена проводящей водой C и опирается на изолирующий материал I. (b) натертая стеклянная трубка поляризует струну. (c) Свободный конец струны погружен в воду. Заряды, которые находились на конце струны, распространялись по всей системе, электризуя воду. (d) Уберите трубку со шнуром. Вода остается наэлектризованной.

Предположим теперь, что вода находилась в проводящей тарелке, опирающейся на другой проводник (как деревянная или металлическая пластина, соединенная с землей). В этом случае было бы невозможно электризовать воду с помощью процедуры Грея (то есть, когда электрическая стеклянная трубка перемещается под и над тарелкой), а также с помощью процедуры Дюфе (то есть касания воды свободным концом проводящей нити, соединенной с электризованной стеклянной трубкой), как показано на Рис. 12.17.

потертая стеклянная трубка поляризует присоединенную к ней проводящую нить, Рис. 12.17 (b). Когда свободный конец этой поляризованной нити касается заземленной воды, нижние заряды нити нейтрализуются свободными зарядами на Земле, Рис. 12.17 (c). После удаления трубки с нитью, электризация воды не наблюдается, Рис. 12.17 (d).

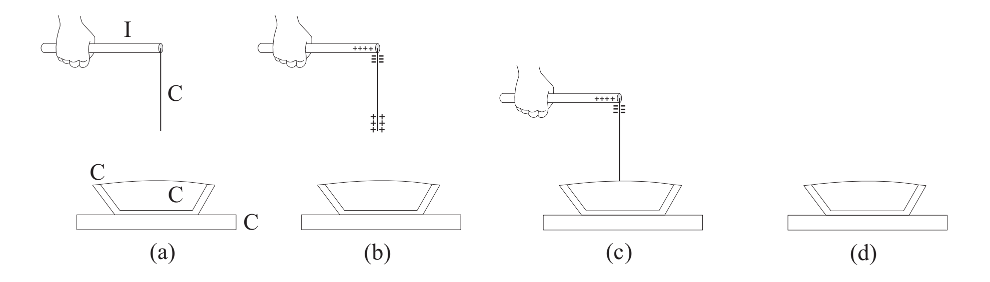


Рис. 12.17: (a) Стеклянная трубка I со струной C на конце. Заполненная водой тарелка на проводящей подставке. Проводники представлены буквой C, а изоляторы – I. (b) натертая стеклянная трубка с поляризованной струной. (c) Струна, касающаяся заземленной воды. Земля нейтрализует заряды на свободном конце струны. (d) Удалите трубку с ее струной. Вода не электризуется этой процедурой.

12.5 Первые конденсаторы

В этом разделе описывается изобретение конденсатора. Он был случайно открыт в 1745 году в Германии и Голландии, и его обычно называли лейденской банкой (или лейденской склянкой).[26] В то время никто не знал, как он работает – даже ученые, занимающиеся конкретно электричеством. Он нарушал правило Дюфе, описанное в разделе 12.4. Люди, которые обнаружили этот инструмент, работали с электростатическим генератором. Обычно это был стеклянный шар или цилиндр, вращающийся вокруг неподвижной оси с рукояткой. Вращающееся стекло натирали рукой человека или другим телом (подушкой, куском хлопчатобумажной ткани или кожи). Герике опубликовал в 1672 году несколько экспериментов, в том числе с пуховым пером, плавающим над натертым серным шаром. Фрэнсис Хоуксби специально построил около 1708 года первые электрические генераторы.[27] Георг Матиас Бозе (1710-1761) около 1740 года усовершенствовал эти генераторы и ввел так называемый *первичный проводник*. По сути, это был проводник, изолированный от земли. Это может быть меч, железный слиток или пушечное дуло. Один конец первичного проводника был в контакте или очень близко к вращающемуся стеклу. Этот конец также мог находиться в контакте или очень близко к подушке, хлопчатобумажной ткани или коже, которые трутся о вращающееся стекло. Первичный проводник накапливал заряды, образованные трением стекла. Этот прием облегчал проведение экспериментов по проводимости или разряду через свободный конец первичного проводника.[28] Изолирование от земли достигалось использованием изолирующих опор или вешая проводник на изолирующие струны.

Первый конденсатор был построен в Германии Эвальдом Юргеном фон

[26] [Whi73a, стр. 45], [Hei99, Глава XIII: Изобретение конденсатора] и [JG17].
[27] Раздел 4.11 из [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].
[28] [Hei66] и [Hei99, стр. 264-265].

Клейстом (1700-1748) в 1745 году. У него была электростатическая машина с подключенным к нему первичным проводником. Близлежащий сосуд с водой был изолирован от земли. Затем воду приводили в контакт с первичным проводником через металлическую проволоку, погруженную в жидкость. Запустив машину, ему удалось получить искры из своей системы. Затем он заменил заполненную водой емкость изолированной деревянной катушкой. Установив гвоздь на катушку и запустив машину, он смог попеременно вытягивать искры из гвоздя и катушки. Хотя эта система была подключена к первичному проводнику, она была изолирована от земли.

Затем идет его описание конденсатора. Гвоздь был введен в маленькую стеклянную бутылку, изолированную от земли. Он был присоединен к машине с проводником. Машина была запущена и система электризована. Затем он взял стеклянную бутылку рукой. То есть он заземлил систему. Отсоединение гвоздя от машины приводило к электрическим эффектам большей мощности и большей продолжительности, чем эффекты, получаемые с изолированной стеклянной бутылкой. Это случайное открытие привело к созданию первого конденсатора:[29]

> Если ввести гвоздь или прочный провод в маленькую бутылочку с узкой горловиной и наэлектризовать его, последуют особенно сильные эффекты. Стекло должно быть очень сухим и теплым. Все работает лучше, если поместить внутрь бутылки немного ртути или спирта. Вспышка появляется на маленькой бутылочке, как только она отсоединяется от машины, и я смог сделать шестьдесят шагов по комнате при свете этого маленького горящего инструмента.

Рис. 12.18 (a) иллюстрирует этот эксперимент.

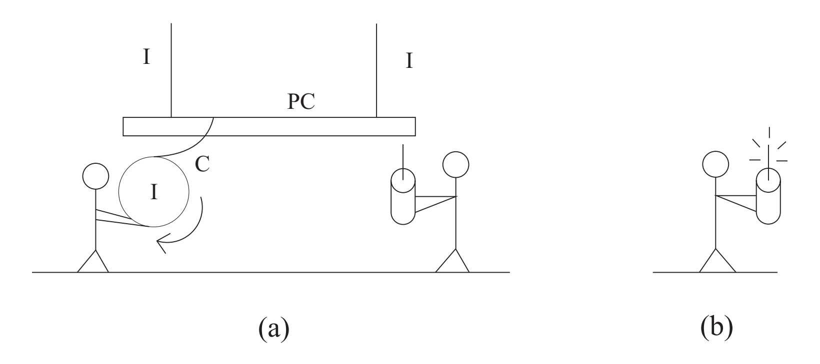


Рис. 12.18: (a) Электризация стеклянной бутылки с гвоздем. (b) Система светит, когда человек ходит по комнате с бутылкой в руках.

Электростатический генератор представляет собой изолирующий стеклянный шар, вращающийся вокруг своей оси. Он может быть наэлектризован трением о руки, которые касаются его. Первичный проводник PC соединен с землей проводящей проволокой C, подвешенной на изоляционных

[29] [Hei99, стр. 310].

кабелях I. Первичный проводник электризуется через проводник, который касается натертого шара. Он также электризуется, когда один конец провода остается очень близко к потертому шару. Человек держит маленькую стеклянную бутылку с гвоздем. Когда кончик гвоздя касается первичного проводника или находится очень близко к нему, бутылка становится наэлектризованной. Когда человек берет эту бутылку и ходит с ней по комнате, гвоздь сияет благодаря коронному эффекту (электрические разряды в воздухе), Рис. 12.18 (b). Стеклянная бутылка также электризуется, если гвоздь непосредственно касается вращающегося шара (или когда его кончик находится очень близко к нему), в то время как человек держит бутылку в руках.

Он продолжает свое описание следующим образом:[30]

> Если я сильно электризую гвоздь так, чтобы свет внутри стекла и искры были видны, я могу взять его в другую комнату и зажечь винный спирт или скипидар.

Ему самому было любопытно, как работает его инструмент:[31]

> Что действительно удивляет меня во всем этом, так это то, что мощный эффект проявляется только в руке. Пламя невозможно зажечь, если он [инструмент] лежит на столе. Как сильно я бы не наэлектризовал флакон, если я поставлю его на стол и поднесу к нему палец, нет никакой искры, только сильное шипение. Как только я беру его снова в руки, не электризуя его заново, он демонстрирует прежнюю силу.

Согласно правилу Дюфе, упомянутому в разделе 12.4, система должна была бы разрядиться, когда она заземлена руками человека, который держит ее и ходит по комнате. Однако разряда не было. Произошло нечто противоположное, а именно, электрические эффекты были сильнее с заземленной стеклянной бутылкой, чем с изолированной бутылкой.

Аналогичное открытие было сделано независимо в Голландии, тоже в 1745 году. Профессор экспериментальной физики в городе Лейден Мушенбрук (1692-1761) хотел получить искры из электризованной воды. У него был сосуд с водой на изолирующей опоре. Проводящая проволока соединяла воду с первичным проводником электрического генератора. Запустив машину, он наэлектризовал первичный проводник и подключенную к нему воду. Палец, при его приближении к первичному проводнику, вызывал искры. Адвокат Кунней знал об этих экспериментах, поскольку он часто посещал лабораторию Мушенбрука. Когда он попытался повторить этот эксперимент дома, он непреднамеренно держал сосуд для воды в руках вместо того, чтобы поставить его на изолирующую подставку. Когда он попытался произвести искры пальцем, поднося его близко к первичному проводнику, или приближая палец к проводнику, соединенному с водой, он получил

[30] [Hei99, стр. 310-311].
[31] [Hei99, стр. 311].

сильный удар. Он сообщил о своем открытии Мушенбруку и его помощнику Алламанду. Повторяя эту процедуру, они также получили сильный шок. Наиболее известное описание этого эксперимента было представлено Мушенбруком в письме Ремеру (1683-1757), написанном в январе 1746 года, которое было опубликовано в трудах Парижской академии наук:[32]

> Поскольку я вижу, что этот лист [содержащий метеорологические наблюдения] заполнен не полностью, я хотел бы рассказать вам о новом, но ужасном эксперименте, который я советую вам никогда не пытаться самостоятельно, да и себе тоже, который испытал его и выжил по воле Божьей, повторить его снова в посул за все королевство Франции. Я занимался демонстрацией сил электричества. Железная труба AB была подвешена на сине-шелковых нитях; быстро вращающийся и потертый глобус находился около A и передавал свою электрическую силу AB. С точки B, находящейся рядом с другим концом, свисал медный провод; в правой руке я держал глобус D, частично заполненный водой, в которую погружался провод; левой рукой E я попытался вытянуть щелкающие искры, перескакивающие от железной трубки к пальцу; после этого я получил в правую руку F удар такой силы, что все мое тело дрожало, как после удара молнией. Обычно удар не разбивает стекло, каким бы тонким оно ни было, и не отталкивает руку [от флакона]; но рука и все тело были поражены так ужасно, что я не могу это описать. Я думал, что мне пришел конец. Но вот некоторые любопытные детали. Когда глобус D сделан из английского стекла, эффект отсутствует, или почти отсутствует; немецкое стекло должно быть использовано, голландское тоже не работает; D не обязательно должно быть глобусом, подойдет стакан для питья; также не имеет значения, большой он или маленький, толстый или тонкий, высокий или короткий, или какой-либо конкретной формы; но он должен быть сделан из немецкого или богемского стекла. Глобус, который чуть не убил меня, был из очень тонкого белого стекла диаметром пять дюймов. Большинство других достойных внимания деталей явления я здесь опускаю. Достаточно сказать, что человек должен стоять прямо на земле; искру должен вытягивать тот же человек, кто держит глобус; эффект незначительный, если участвуют двое, один поддерживая глобус, а другой вытягивая искры. Если глобус D опирается на металл, лежащий на деревянном столе, и кто-то касается металла одной рукой и вытягивает искры другой, он также будет поражен огромной силой. Я узнал об электричестве так много, что уже ничего не понимаю и ничего не могу объяснить. Ну, я заполнил [теперь] этот лист довольно подробно.

Первое изображение этого эксперимента было представлено Нолле в 1750 году, Рис. 12.19.[33]

Хотя он говорит, что больше не стал бы повторять этот эксперимент, его собственное описание указывает на то, что некоторые вариации были

[32] [Hei99, стр. 313-314].
[33] [Hei99, стр. 285].

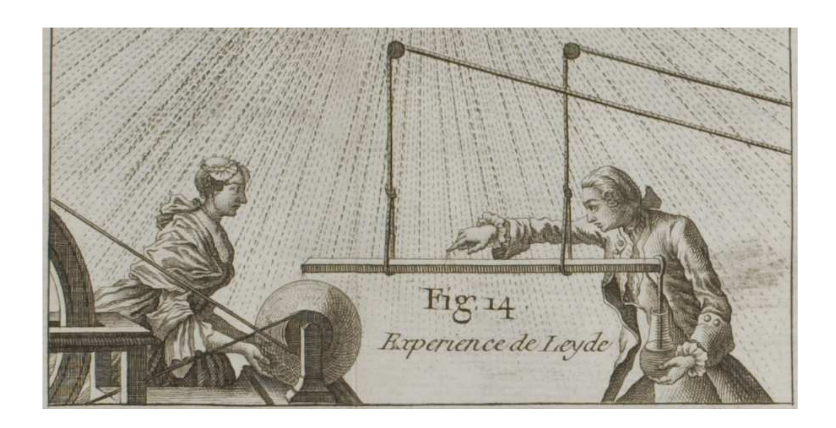


Рис. 12.19: Первая иллюстрация эксперимента с лейденской банкой. Горизонтальная полоса представляет собой железную трубку AB, описанную Мушенбруком, подвешенную на изолирующих шелковых нитях, а банка в руке экспериментатора представляет стеклянный глобус D.

опробованы путем изменения типа, толщины и формата стекла. Вероятно, немецкое стекло, которое он использовал при получении удара, вело себя как хороший изолятор, позволяющий накапливать противоположные заряды на обеих ее сторонах (то есть на внутренней и внешней сторонах бутылки). Английские и голландские стекла, с другой стороны, вероятно, вели себя как проводники в электростатических экспериментах. Тогда они не допустили бы накопления противоположных зарядов на внутренней и внешней сторонах стекла.

Другая иллюстрация эксперимента Куниуса представлена на Рис. 12.20.[34]

Рисунки 12.19 и 12.20 иллюстрируют стеклянный глобус, вращающийся вокруг своей оси. Он электризуется при трении руками, касающимися его. Горизонтальный металлический стержень подвешен на изолирующих струнах. На Рис. 12.19 брусок электризуется разрядами в воздухе, поскольку его конец находится очень близко от вращающегося шара. На Рис. 12.20, с другой стороны, он электризуется металлической цепью, касающейся его, в то время как другой конец цепочки касается вращающегося глобуса. В конце этого стержня есть металлическая проволока, погруженная в воду, которая находится внутри стеклянной банки. Человек держит банку в руке. Он пытается вытянуть искру другой рукой, приближая ее стержню или металлической проволоке. В этот момент он испытывает сильный шок.

Бенджамин Франклин дал рабочий механизм лейденской банки.[35] Главный фактор его объяснения состоит в том, что стеклянный сосуд ведет себя как изолятор. Вода внутри банки действует как проводник, который соприкасается с ее внутренней стенкой. Рука человека, державшего банку, ведет себя как еще один проводник, который находится в контакте с внеш-

[34] [Des76, Часть 3, стр. 570, Рисунок 382].
[35] [Hei99, стр. 330-334].

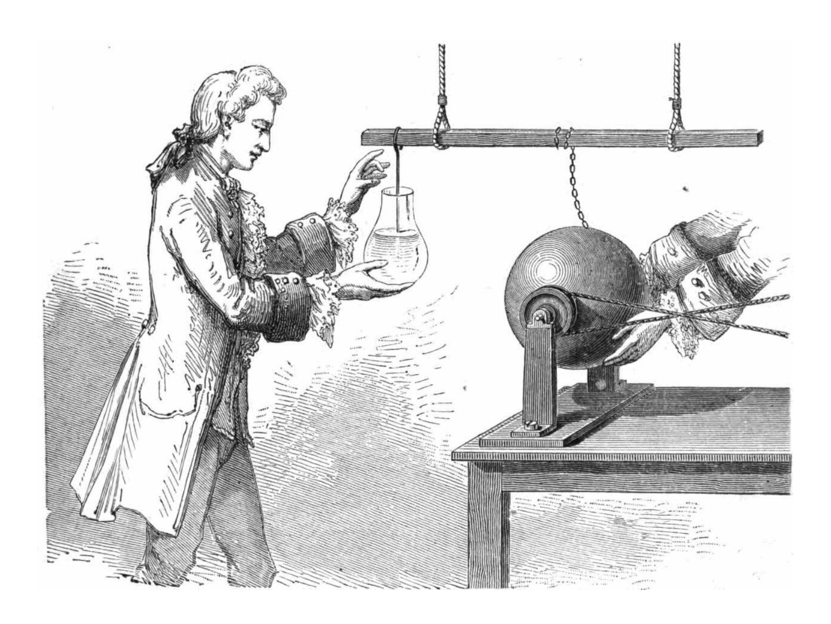


Рис. 12.20: Другая иллюстрация эксперимента с лейденской банкой.

ней стенкой банки. Человек, держащий банку, служит как заземление ее внешней стенки. Вода контактирует с первичным проводником через металлическую проволоку. Запущенный генератор электризует вращающийся глобус, первичный проводник, металлическую проволоку и воду. Все эти проводники приобретают электрический заряд того же знака, что и заряд на поверхности натертого глобуса. Внешняя поверхность банки заземлена рукой человека, держащего ее. При запуске генератора рука человека, держащего банку, становится электризованной с зарядом, противоположным знаку заряда вращающегося шара. Когда банку отсоединяют от генератора, удерживая ее в руке, мы имеем наэлектризованный конденсатор, с равными и противоположными зарядами, распределенными по поверхностям проводников, контактирующих с внутренней и внешней стенками стеклянной банки. Франклин писал следующее в письме 1747 года своему другу Коллинсону:[36]

> В то же самое время, когда провод и верх бутылки и т. д. электризовались *положительно* , дно бутылки электризовалось *отрицательно*, в той же пропорции; то есть, какое бы количество электрического огня не скопилось наверху, равное количество накапливается внизу.[37]

Во время разрядки банки, обязательно должен быть путь для передачи

[36] [Fra69, стр. 13], [Fra04, Том 2], [Hei99, стр. 331] и [Mor04b, Version 1.3, Section III, стр. 4].

[37] [Сноска, добавленная Франклином в более позднем издании его книги:] Что сказано здесь и дальше о *верхней* и *нижней* частях бутылки верно также для *внутренней* и *внешней* поверхностях, что должно быть специально отмечено.

электрического огня между внешним проводящим покрытием и внутренним проводящим покрытием. Этот путь не проходит через изоляционное стекло. Франклин указал, что этот путь проходит через проводник, касающийся верхней и нижней части бутылки (или ее внутреннего и внешнего покрытия):[38]

> 3. Равновесие не может быть восстановлено в бутылке посредством *внутренней* связи или контакта частей; это должно быть сделано с помощью коммуникации *вне* бутылки между верхом и низом, каким-то неэлектрическим [то есть каким-то проводником], касающимся или приближающимся к обоим одновременно; в этом случае он восстанавливается с невыразимой силой и быстротой; или касаясь каждого поочередно, в коем случае равновесие восстанавливается постепенно.

Предположим, человек держит в одной руке электризованную банку. Когда он касается другой рукой проводник, который находится в контакте с водой, он почувствует сильный удар. Удар вызван внезапным электрическим током через его проводящее тело. Произойдет нейтрализация противоположных зарядов, расположенных внутри и снаружи банки, которые были разделены изоляционным стеклом и окружающим воздухом.

Вы можете получить представление о шоке, которому подверглись Кунней и Мушенбрук, используя электрофор и лейденскую банку, описанные в разделах 6.1 и 12.1. Для этого используйте противень для пиццы диаметром 30 см с изолирующей ручкой в центре, Рис. 2.15 (d). Изолирующая основа этого электрофора может представлять собой квадратную пластину из ПВХ со сторонами 40 см. Его можно наэлектризовать, быстро потирая бумажной салфеткой или хлопковой тканью. Лейденская банка может представлять собой пластиковую бутылку объемом 200 или 300 мл, Рис. 12.2. Механизмы зарядки и разрядки лейденской банки были описаны в эксперименте 12.4. Эксперименты Грея и Дюфе, описанные в разделе 12.4, вместе с экспериментами на лейденской банке, описанными в этом разделе, показывают, что вода может накапливать электричество. Это свойство воды проводить было использовано в электростатическом генераторе Кельвина.[39] Эксперименты с использованием этого факта проводят и в наши дни.[40]

[38] [Fra69, стр. 13-14], [Fra04, Том 2] и [Mor04b, Версия 1.3, Раздел III, с. 5].
[39] Раздел 7.12 из [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].
[40] [APZ06], [OP09], [San11], [Pol13, Глава 5] и [GB17, Глава 6].

Глава 13

Сохранение электризации тел

В этой главе описаны некоторые способы продления времени, в течение которого тело может сохранять электризацию.

13.1 Разряд через воздух

Эксперимент 13.1 - *Разрядка изолятора*

Электризованные изоляторы и проводники обычно теряют заряд в открытом воздухе в течение нескольких минут.[1]

Рассмотрим, например, пластиковую соломку, наэлектризованную трением о волосы. Она притягивает к себе кусочки бумаги, Рис. 1.3. Однако через несколько минут или несколько часов натертая соломка перестает притягивать маленькие кусочки бумаги. 13.1.

Временной интервал, необходимый для того, чтобы натертая соломка потеряла электризацию, зависит от многих факторов: проводимости воздуха, количества электричества, которое она приобрела при первом растирании, является ли пластмасса хорошим или плохим изолятором и т. д. В очень сухую погоду хорошо заряженная солома может оставаться наэлектризованной в течение нескольких часов. Во влажные дни она разряжается через несколько минут.

Эксперимент 13.2 - *Разрядка проводника*

Проводник также теряет свою электризацию в открытом воздухе. Втирайте в волосы пластиковую соломку, а затем поцарапайте ее по краю тонкого картона, заряжая таким образом электроскоп, Рис. 13.2 (a). Оставьте

[1] Разделы 7.13 и 7.14 из [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

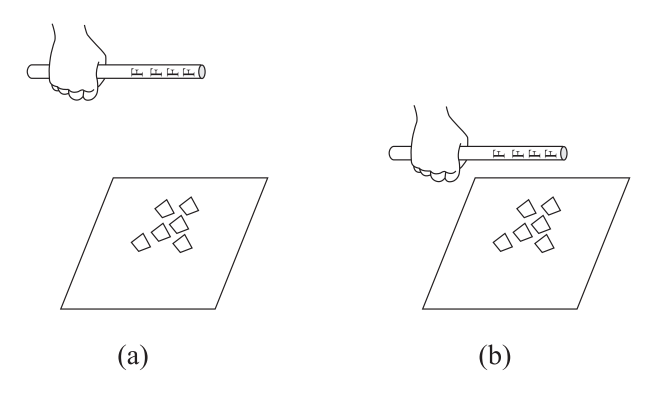


Рис. 13.1: (a) Натертая соломка находится далеко от маленьких кусочков бумаги. (b) Потертая соломка теряет свою электризацию через несколько часов после зарядки трением. Соломка больше не притягивает маленькие кусочки бумаги, когда она приближается к ним.

его на столе в сухой день. Он разряжается медленно, что видно по его полоске. В течение часа или раньше он полностью теряет заряд, Рис. 13.2 (b).

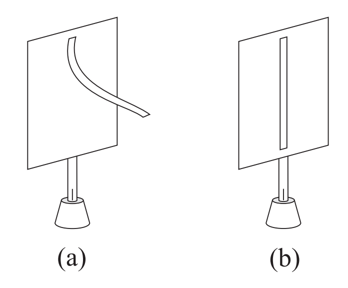


Рис. 13.2: (a) Заряженный электроскоп. (b) Электроскоп полностью разряжается через час в открытом воздухе.

Время разряда снова зависит от многих факторов: атмосферных условий, количества электричества, которое оно получило при царапании натертой соломкой по картону, формы и размера электроскопа, проводимости соломки, поддерживающей картон, и т. д. Чем суше погода, тем дольше она будет оставаться наэлектризованной.

Как мы можем продлить временя, в течение которого изоляторы и проводники остаются наэлектризованными?

13.2 Сохранение электризации изоляторов

Простейшим способом увеличения времени удержания электризации заряженного изолятора является предотвращение его контакта с открытым воз-

духом.[2]

Эксперимент 13.3 - *Обертка заряженного изолятора проводником*

Электризуйте однообразно 10 или 20 пластиковых соломок, быстро втирая каждую из них в волосы или лист бумаги. Поместите их рядом на кусок хлопчатобумажной ткани или лист бумаги (как бумажная салфетка), Рис. 13.3 (a). Накройте соломки, Рис. 13.3 (b). Обернутый набор соломок можно хранить в коробке для обуви.

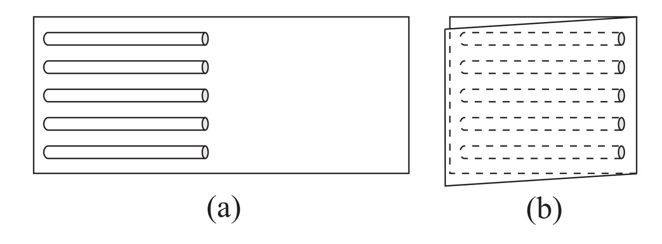


Рис. 13.3: (a) Натертая соломка на хлопчатобумажной ткани или куске бумаги. (b) Завернутые соломки.

Через фиксированный интервал времени (один раз в день или один раз в неделю) достаньте одну из соломок и проверьте ее электризацию. Чтобы обнаружить присутствие небольших количеств электричества, тесты должны быть чувствительными. Наблюдайте, притягивает ли она полоску папиросной бумаги разряженного электроскопа, притягивает ли она бумажный диск разряженного электрического маятника или поворачивает ли она металлический версориум. Когда обернутые соломки изначально хорошо заряжены, обратите внимание, что они остаются наэлектризованными в течение нескольких дней, недель или даже месяцев.

Интервал времени, в течение которого соломка остается наэлектризованной, снова зависит от нескольких факторов, таких как погодные условия, степень зарядки, которую она получила от трения, является ли материал соломки хорошим изолятором или нет и т. д.

Эксперимент 13.4 - *Обертывание заряженного изолятора другим изолятором*

В эксперименте 13.3 соломки были обернуты проводниками, как кусок хлопка или бумаги. Повторите эту процедуру, на этот раз завернув натертую соломку в изолирующий пластиковый пакет. В этой ситуации соломки также остаются наэлектризованными в течение нескольких дней, недель или месяцев.

Эксперимент 13.5 - *Обертывание заряженной соломки листом бумаги и полиэтиленовым пакетом*

[2] [Grad], [Bos11, Глава 8] и [BAC12, Глава 9].

Вы также можете увидеть, как долго натертая соломка, завернутая в проводники (например, лист бумаги), остается наэлектризованной по сравнению с натертой соломкой, завернутой в изоляторы (например, пластиковый пакет). В один и тот же день оберните часть соломок в проводники, а другие – в изоляторы. соломки должны быть одинаково наэлектризованы перед оберткой. Время от времени берите одну соломку, завернутую в проводник, и другую соломку, завернутую в изолятор. Проверьте электризацию каждой из них.

Выполняя этот эксперимент, можно заметить, что соломки, обернутые изолятором, сохраняют электризацию лучше, чем обернутые проводником. Мы также наблюдаем, что соломки, обернутые в изоляторе, остаются наэлектризованными дольше, чем соломки, обернутые в проводнике.

В таблице 13.1 сравниваются интервалы времени, в течение которых заряженные соломки остаются наэлектризованными при хранении в открытом воздухе, в бумажной или пластиковой упаковке.

Условие хранения	Продолжительность
В открытом воздухе	Несколько минут
Завернутый в проводник	Дни, недели или несколько месяцев
Завернутый в изолятор	Дни, недели или несколько месяцев

Таблица 13.1: Приблизительные интервалы времени для разрядки наэлектризованной соломки.

Эксперимент 13.6 - *Электризованная пластина разряжается через воздух*

Используйте в этом эксперименте доски или плиты из ПВХ и пенопласта. Они могут быть любой формы. Например, квадрат со стороной 20 или 30 см в длину, круг диаметром 20 или 30 см и т. д. Быстро потрите одну сторону каждой из них листом бумаги или салфеткой. Затем оставьте эти пластины в открытом воздухе потертыми сторонами вверх. Каждые 10 минут проверяйте их электризацию. Например, проверьте, не притягивает ли натертая поверхность полоски папиросную бумагу разряженного электроскопа, притягивает ли она диск разряженного электрического маятника или ориентирует металлический версориум. Измерьте, как долго поверхность остается наэлектризованной.

В зависимости от погодных условий, от изолирующих свойств пластины и от величины начального заряда, полученного в результате трения, пластины могут оставаться наэлектризованными в течение примерно от 10 минут до одного часа.

Эксперимент 13.7 - *Наложенные наэлектризованные пластины*

Повторите эксперимент 13.6. Электризуйте пары пластин из одинакового материала, одинаковой формы и одинакового размера. Наложите пластины из одного и того же материала так, чтобы натертые стороны были

обращены друг к другу. Свяжите их вместе резинками и поместите в обувную коробку на хранение. Время от времени доставайте одну из этих пар и проверяйте электризацию внутренних поверхностей. Если пара остается наэлектризованной, снова наложите натертые поверхности и продолжайте хранить их в обувной коробке.

Убедитесь, что с этой процедурой натертые стороны могут оставаться наэлектризованными в течение дней, недель или нескольких месяцев, Таблица 13.2. Как всегда, время разрядки зависит от величины начального заряда, приобретенного трением, от изолирующей способности пластины, от погодных условий и т. д.

Пластина в открытом воздухе	От нескольких минут до 1 часа
Наложенные пластины	От одного дня до нескольких месяцев

Таблица 13.2: Приблизительные интервалы времени для разрядки электризованной изолирующей пластины.

13.2.1 Некоторые комментарии к этим экспериментам

Эксперименты этого раздела показывают, что интервал времени, в течение которого изолятор остается наэлектризованным, может быть значительно продлен посредством защиты его от окружающего открытого воздуха. Очевидно, что натертые соломки остаются в контакте с воздухом при их обмотке листом бумаги, тканью или пластиком. То же самое происходит, когда две натертые пластины накладываются и хранятся в бумажной коробке. Однако, состав молекул воздуха вокруг этих обернутых тел примерно один и тот же и мало меняется с течением времени. С другой стороны, когда наэлектризованное тело находится в открытом воздухе, разные молекулы воздуха и разные заряженные ионы будут присутствовать вокруг него. Это обстоятельство может оказаться одной из основных причин, увеличивающих время разрядки обернутых тел по сравнению со временем разрядки тел, находящихся в открытом воздухе.

Электризованная соломка может разряжаться в открытом воздухе через механизм ПКО. Водяной пар, другие частицы, молекулы и ионы, присутствующие в воздухе, могут притягиваться соломкой, прикасаться к ней, приобретать часть заряда на соломе, а затем отталкиваться ею. Обертывание соломки исключает в какой-то степени возможность этого механизма.

Есть другой момент, который тоже может играть здесь роль. Когда наэлектризованная пластиковая соломка обернута проводящим или изолирующим материалом, в материалах обертки происходит перераспределение зарядов. Следовательно, *полная или результирующая сила*, действующая на внешние частицы воздуха, теперь имеет меньшую интенсивность. Эти внешние частицы воздуха содержат молекулы, ионы, примеси и т. д. Суммарная сила, оказываемая на них обернутым телом, теперь связана не толь-

ко с наэлектризованной соломкой, но и с перераспределением зарядов на проводящем или изолирующем материале вокруг соломки. Общая сила, действующая на любую внешнюю частицу, теперь меньше, чем сила, вызванная только соломкой. Эти внешние частицы имеют меньшую тенденцию взаимодействовать с электризованной соломкой.

13.3 Сохранение электризации проводников

Эксперимент 13.8 - *Лейденские банки*

Эксперимент 13.2 показывает, что заряженный проводник в открытом воздухе теряет свою электризацию в течение нескольких минут. Мы опишем теперь процедуру, которая значительно увеличивает время сохранения электризации.

Используйте здесь лейденскую банку, изготовленную из стеклянной бутылки объемом 200 или 300 мл.[3] В идеале у вас должно быть 5 или 10 бутылок одинакового размера и формы, изготовленные из одного материала. Одна такая бутылка показана на Рис. 12.2. Она будет электризована с помощью электрофора Вольта, изготовленного с использованием сковородки для пиццы диаметром 30 см и ручки из ПВХ, акрила или твердого пластика. Изолирующая подставка этого электрофора может представлять собой квадратную пластину из ПВХ со сторонами 40 см. Это изолирующее основание электризуется быстрым трением о бумажную салфетку или хлопчатобумажную ткань, Рис. 6.1 (a). Сковородку для пиццы электризуют, следуя процедуре, показанной на рисунках 6.2 до 6.4. Форма для пиццы разряжается, когда она подносится очень близко к металлическому шарику заземленной лейденской банки, Рис. 12.6. Лейденскую банку можно хорошо наэлектризовать, повторяя эту процедуру раз 20. После зарядки, бутылки следует хранить на полке или в шкафу, с указанием даты когда они были электризованы.

Через равные промежутки времени (1 час, 1 день или 1 неделя) проверьте электризацию одного из этих бутылок. Для этого просто прикоснитесь одним пальцем к внешней проводящей полоске бутылки и поднесите другой палец той же руки очень близко к металлическому шарику. Предположим, что есть искра, подобная той, которая показана на Рис. 12.7. Это означает, что бутылка оставалась наэлектризованной с момента ее зарядки. Разряженная бутылка больше не должна использоваться в этом эксперименте. Через другой такой же промежуток времени проверьте заряд другой бутылки, хранящейся на полке. Повторяйте эту процедуру, пока все бутылки не будут разряжены.

Выполнив этот эксперимент, убедитесь, что заряженная бутылка может оставаться наэлектризованной в течение нескольких дней (в течение недели, например). Точный интервал времени зависит от начальной степени

[3] Раздел 12.1 и [MF].

электризации, от изоляционных свойств бутылки, от ее размера и формы, и т. д.

Этот эксперимент можно провести и с одной бутылкой. Следуя описанной процедуре, зарядите ее. Через 1 час, 1 день или 1 неделю проверьте ее электризацию. После того, как бутылка будет разряжена, зарядите бутылку снова примерно до того же уровня, следуя той же процедуре. Затем через 2 часа, 2 дня или 2 недели проверьте его электризацию. После того, как она разрядится, зарядите ее еще раз. Затем через 3 часа, 3 дня или 3 недели проверьте ее электризацию. Повторяйте эту процедуру до тех пор, пока бутылка не потеряет полностью электризацию по прошествии определенного интервала времени (например, 10 часов, 10 дней или 10 недель). Выясните, как долго она сохраняет электризацию, пока хранится в безопасном месте.

Затем мы можем сравнить эксперимент 13.2 с экспериментами этого раздела. Эти последние эксперименты показывают, что заряды, расположенные на внутреннем и внешнем проводниках такого конденсатора, как лейденская банка, хранятся дольше, чем заряды на проводящем картоне электроскопа, поддерживаемого в открытом воздухе.

13.4 Электреты

13.4.1 Определения

Электрет – это кусок диэлектрического материала, обладающего постоянным электрическим зарядом или постоянной электрической поляризацией. В действительности количество электризации любого тела со временем уменьшается. Однако, когда характеристическая постоянная для времени затухания заряда намного больше, чем период времени, в течение которого проводится исследование с этим материалом, наэлектризованное тело можно считать электретом. Например, когда эксперимент длится несколько секунд, тело с электризацией, которая длится несколько минут, можно считать электретом. В этом смысле соломки или пластиковые линейки, наэлектризованные трением, можно считать электретами в отношении большинства экспериментов, описанных в этой книге. Есть некоторые инструменты, в которых внутренние элементы должны оставаться наэлектризованными в течение недель или месяцев. В этих случаях тело, которое остается наэлектризованным в течение года, можно считать хорошим электретом. Теперь мы можем уточнить определение:

Определение 13.1 - *Электрет*

Электреты представляют собой куски изолирующих материалов, демонстрирующие квазипостоянную электризацию или дипольную поляризацию с константой времени затухания заряда, намного более длительной, чем период времени, в течение которого проводятся исследования с телом.

Обычно слово «электрет» используется только тогда, когда электризация или поляризация длится несколько месяцев, лет или десятилетий. Это слово было придумано в 1885 году Оливером Хевисайдом (1850-1925):[4]

> Очевидно нужен новый термин для описания тела, обладающего естественной постоянной электризацией в силу внутренних причин. Заметив, что «магнит» получен путем сокращения слова «магнетизм», возможно, мы можем получить то, что хотим, проделав подобную операцию с электричеством. «Электрик», который является результатом такой операции, был бы очень хорошим названием для тела, находящегося в состоянии постоянной электризации, если бы не было следующих двух возражений. Во-первых, когда-то он использовался для обозначения того, что мы теперь называем диэлектриком или изолятором; и во-вторых, электрик [electric] используется теперь как прилагательное с эквивалентным смыслом электрический [electrical]. Первое из этих возражений едва ли имеет какой-то вес, поскольку использование этого слова в качестве существительного полностью устарело. Последнее возражение тяжелее, но тоже не имеет большого веса. Другое слово, которое напрашивается само собой, это «электрет», против которого нечего возразить, за исключением того, что оно звучит странно. Однако, это всего лишь дело привычки.

Существует несколько видов электретов и различные способы его получения. Есть также много классификаций электретов, которые варьируются от автора к автору. Здесь мы даем простую классификацию.

Электреты с суммарным или результирующим зарядом, отличным от нуля, называются монополярными электретами, электретами с избыточным зарядом, электретами с реальным зарядом или электретами с чистым зарядом. Рис. 13.4 (a) иллюстрирует электрет с поверхностным зарядом, тогда как Рис. 13.4 (b) показывает материал с реальным распределением заряда внутри диэлектрика, иногда называемый электретом с пространственным зарядом.

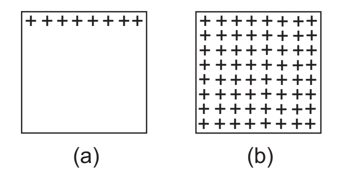


Рис. 13.4: (a) Электрет с реальным поверхностным зарядом. (b) Электрет с реальным избыточным зарядом в объеме диэлектрика.

Тела с нулевым полным зарядом и постоянной электрической поляризацией называются биполярными, дипольными или поляризованными электретами. Рис. 13.5 (a) представляет поляризованный электрет с реальными

[4][Hea87, Статья 30: Электромагнитная индукция и ее распространение, раздел 12: Электризация и электрификация. Природные электреты, с. 488], [JW80] и [Sil10b, pág. 30].

и противоположными поверхностными зарядами. Рис. 13.5 (b) показывает поляризованный электрет с противоположными действительными зарядами, распределенными в объеме диэлектрика. Рис. 13.5 (c) иллюстрирует электрет, содержащий ориентированные (выровненные) молекулярные диполи.

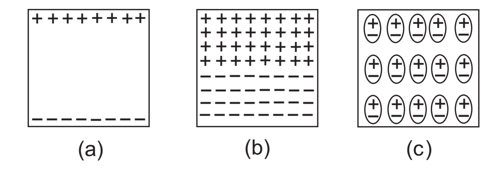


Рис. 13.5: Поляризованные электреты. (a) С реальными и противоположными поверхностными зарядами. (b) С противоположными действительными зарядами, распределенными в объеме диэлектрика. (в) Содержащие ориентированные молекулярные диполи.

Электрет на Рис. 13.5 (c) является электростатическим эквивалентом постоянного магнита.

Обычный электрет может иметь квазипостоянные заряды всех этих видов, Рис. 13.6.

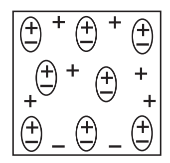


Рис. 13.6: Общий электрет.

В практических приложениях встречаются электреты с одной или двумя гранями, покрытыми проводящим слоем. Эти случаи не будут обсуждаться здесь.

13.5 Производство электрета

13.5.1 Материалы

Здесь мы покажем, как получить электреты, которые остаются наэлектризованными или поляризованными в течение нескольких дней, недель или месяцев. Эти эксперименты были выполнены Сильвой Младшим и Боссом.[5]

Нужно быть очень осторожным при выполнении этих экспериментов, поскольку мы имеем дело с огнем, газами и дымом от различных веществ. Описание мер безопасности можно найти в соответствующей литературе.[6]

[5] [Sil10a], [Bos11, Раздел 8.2, стр. 234-248] и [BAC12, Глава 19].
[6] [Bos11, Раздел 8.2] и [BAC12, Раздел 19.3].

Материалы, используемые в этих экспериментах: парафин, пчелиный воск, воск карнауба и шеллак. Парафиновый воск обычно получается из нефти и используется для изготовления свечей. В этих экспериментах используется обычный свечной парафин или парафин, который можно приобрести в слитках или таблетках. Карнаубский воск получают из листьев пальмы, которая растет в северо-восточной Бразилии. Обычно он выпускается в виде твердых желтых или коричневых хлопьев, иногда в виде твердого слитка или таблетки. Шеллак или лак представляет собой смолистое вещество, выделяемое некоторыми видами чешуйчатых насекомых на деревьях, растущих в Индии и Таиланде. Обычно он продается в виде сухих хлопьев и используется в качестве красителя или отделки для дерева. Эти материалы можно найти в магазинах строительных материалов, в магазинах по продаже древесины и в некоторых супермаркетах.

Температура плавления этих веществ колеблется от 60 до 80 градусов по Цельсию. Их можно расплавить в пламени кухонной плиты, используя металлическую сковороду, алюминиевые или железные ковши, стеклянные чашки и т. д.

Эксперимент 13.9 - *Изолирующее поведение перед плавлением*

Перед расплавлением этих веществ проверьте их изолирующее или проводящее поведение, следуя процедурам из раздела 3.1. Для жидких веществ или веществ в виде хлопьев, граница заряженного электроскопа должна касаться их, как показано на Рис. 3.6.

Обратите внимание, что полоска папиросной бумаги заряженного электроскопа остается в поднятом состоянии, когда все вещества этого подраздела касаются картона, показывая, что они являются изоляторами.

Эксперимент 13.10 - *Нейтральность заряда перед плавлением*

Проверьте также, электризуются или нет некоторые из этих веществ, перед тем как плавить их. Это можно сделать, поднося каждое из этих веществ близко к металлическому версориуму, к бумажному диску разряженного электрического маятника, к полоске тонкой бумаги разряженного электроскопа или близко к тонкой струе воды, плавно текущей из крана. Если эти тела не притягиваются веществом, оно нейтрально или разряжено, что является типичным результатом при выполнении этого теста.

Иногда воск карнауба показывает небольшую степень электризации на некоторых из его сторон перед расплавлением. Другие вещества обычно не притягивают эти проводящие тела.

13.5.2 Приготовление электретов

Для производства электретов расплавьте эти вещества в перечисленных контейнерах (приемниках), подождите, пока они не остынут и не затвердеют, и, наконец, разогрейте слегка контейнеры, чтобы высвободить материалы. Вся процедура занимает около 4 часов, включая подготовку материала,

изготовление электретов и очистку рабочей среды. Мы предлагаем отвести целый день на пробный запуск, чтобы освоить весь процесс, выяснить, что необходимо на каждом этапе, освоиться с необходимыми материалами и процедурами, и т. д. Затем, со всеми этими приобретенными знаниями, в другой день произвести электреты, которые будут использованы в следующих экспериментах.

Люди обычно готовят электреты, комбинируя различные количества этих веществ, например, смесь воска и смолы. Однако в описанных здесь экспериментах мы будем использовать одно вещество в каждом контейнере.

Воск и парафин были разбиты на куски, прежде чем помещать их в контейнеры. Поместите контейнеры прямо в огонь, или нагрейте их в водной ванне, где нагревание происходит плавно и постепенно. После расплавления, контейнер снимают с источника тепла и дают веществу остыть и затвердеть. Этот процесс длится от 1 до 3 часов. Вода не должна попадать внутрь контейнера в течение всей этой процедуры. Вещество будет удалено из контейнера после его охлаждения до температуры окружающей среды. Изолирующая ручка облегчает удаление вещества и дальнейшее его манипулирование при проведении экспериментов. Для этого ручку следует воткнуть в вещество, прежде чем оно затвердеет. В качестве ручки можно взять, например, пластиковую трубку или акриловую линейку, Рис. 13.7 (a). Когда вещество остынет и станет жестким, контейнер нужно кратковременно разогреть, чтобы удалить электрет, Рис. 13.7 (b).

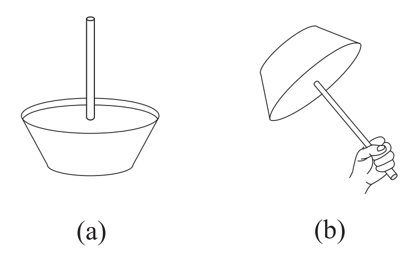


Рис. 13.7: (a) Расплавленное вещество с изолирующей ручкой внутри нагревательного контейнера. (b) Твердый электрет.

Однако иногда нелегко вынуть разогретый электрет из контейнера даже с помощью ручки. Возможно придется деформировать металлическую форму или разбить стеклянную чашу, чтобы достать его. Например, шеллак может стать рассыпчатым или хрупким, что затруднит удаление материала в виде целого куска. Парафин немного сжимается, когда затвердевает. Поэтому иногда удается вынуть его из контейнера без разогрева.

Эксперимент 13.11 - *Изоляционные свойства после плавления*

После подготовки электретов, проверьте их изоляционное или проводящее поведение, как в эксперименте 13.9.

Держите электрет рукой и коснитесь им верхний край заряженного электроскопа. Полоска папиросной бумаги не падает. Убедитесь, что все эти вещества после расплавления ведут себя как изоляторы.

Эксперимент 13.12 покажет, что эти вещества наэлектризованы после расплавления и затвердевания. Однако, поскольку они все еще ведут себя как изоляторы после извлечения из контейнеров, вы можете дотронуться до них рукой, не боясь разрядить эти вещества.

Эксперимент 13.12 - *Электризация веществ после плавления*

Держите каждый кусок за ручку или прямо в руке и проверьте его электризацию по методике эксперимента 13.10.

Как правило мы находим, что парафин, шеллак, карнаубский воск и пчелиный воск электризованы. То есть они притягивают ножки металлического версориума, бумажный диск разряженного электрического маятника, полоску папиросной бумаги разрядного электроскопа и струйку воды, вытекающей из крана. Электризация происходит независимо от контейнера, в котором они были расплавлены (алюминий, железо или стекло). Электризация пчелиного воска иногда очень слабая и ее трудно обнаружить.

Эксперимент 13.13 - *Знак заряда электретов после плавления*

Электризуйте два электроскопа по индукции – один положительно, а другой отрицательно.[7] Разместите их на столе отдельно друг от друга. Медленно поднесите электрет близко к поднятой полоске каждого электроскопа. Обычно вещество отталкивает полосу отрицательного электроскопа и притягивает полосу положительного, показывая, что электрет отрицательно электризован.

Не подносите электрет слишком близко к поднятой полосе, если между ними есть отталкивание. В конце концов, отталкивание может превратиться в притяжение, когда это расстояние становится очень маленьким.[8]

Эксперимент 13.14 - *Интервал времени, в течение которого вещества оставались наэлектризованными в открытом воздухе*

Подготовив кусочки, выложите их на открытом воздухе. Время от времени проверяйте их электризацию, как в эксперименте 13.12.

Куски парафина оставались наэлектризованными от нескольких часов до нескольких дней. Куски карнаубского воска оставались наэлектризованными от нескольких дней до нескольких месяцев.

Эксперимент 13.15 - *Интервал времени, в течение которого вещества оставались наэлектризованными при хранении внутри контейнеров, в которых они были расплавлены*

---

[7] Раздел 7.5 [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

[8] Раздел 7.10 из [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

После расплавления и удаления из контейнеров, некоторые куски клали обратно в эти контейнеры после их охлаждения. Время от времени мы брали один из этих кусков. Мы проверяли его электризацию, как в эксперименте 13.12. Затем мы возвращали кусок в контейнер. Эту процедуру повторяли до тех пор, пока кусок полностью не переставал показывать признаки электризации.

Куски парафина оставались наэлектризованными от 5 до 20 дней. Куски карнаубского воска оставались наэлектризованными в течение нескольких месяцев.

Эксперимент 13.16 - *Интервал времени, в течение которого вещества оставались наэлектризованными при хранении в контейнерах, в которых они были расплавлены, с пластиковым пакетом, помещенным между контейнером и веществом*

После приготовления нескольких кусков парафина, они были изъяты из контейнеров. Они были затем завернуты в пластиковый пакет, и вещества были возвращены в контейнеры. Время от времени мы брали вещества и проверяли их электризацию и снова помещали их в упакованные контейнеры. Эту процедуру повторяли до тех пор, пока они не переставали показывать признаки электризации примерно через 7 или 8 дней после расплавления.

Эксперимент 13.17 - *Интервал времени, в течение которого вещества оставались наэлектризованными, когда их оборачивали в проводники и хранили в контейнерах, где они были расплавлены*

Некоторые куски парафина после расплавления и затвердевания были обмотаны проводником (хлопковая фланель или бумажная салфетка) и снова помещены в контейнеры, в которых они были расплавлены. Время от времени их разворачивали. Мы проверяли их электризацию, заворачивали обратно и снова помещали их в контейнеры. Эту процедуру повторяли до тех пор, пока не было больше никаких признаков электризации. Они оставались наэлектризованными от 7 до 12 дней.

Эксперимент 13.18 - *Интервал времени, в течение которого вещества оставались наэлектризованными, когда их оборачивали в проводники*

Мы снимали ручки с некоторых кусков и заворачивали их в проводники (хлопковая фланель, салфетка или лист бумаги). Мы поместили завернутые кусочки в обувную коробку. Время от времени мы брали один из кусков. Затем мы проверяли его электризацию, как в эксперименте 13.12. После каждого теста кусок снова оборачивали и оставляли внутри коробки до следующего теста.

Куски пчелиного воска оставались наэлектризованными около 5 месяцев. Некоторые кусочки парафина оставались наэлектризованными в течение 7 месяцев, другие – не менее 10 месяцев, когда мы прекратили испытания, хотя они оставались еще наэлектризованными. Кусочки шеллака и

карнаубского воска оставались наэлектризованными в течение не менее 10 месяцев (когда мы прекратили испытания, хотя все они оставались наэлектризованными).

———————————————————————————

Следует отметить, что степень электризации этих кусков уменьшалась с течением времени. То есть интенсивность, с которой они притягивали близлежащие тела, уменьшалась со временем в течение дней или месяцев проведения экспериментов. Иногда приходилось приближать куски очень близко к проводникам, которые были изначально нейтральными, чтобы обнаружить притяжение этих проводников.

Эксперименты с 13.14 до 13.18 показывают, что эти куски вещества действительно можно считать электретами, так как они оставались наэлектризованными в течение нескольких дней или месяцев после расплавления.

13.6 Электрофор с основанием из электрета

В главе 6 мы описали электрофор, состоящий из двух частей, а именно: (а) электризованная изолирующая основа и (б) коллектор заряда, состоящий из проводящего диска с изолирующей ручкой. Мы провели несколько экспериментов, используя основу из пенополистирола или ПВХ, которая была наэлектризована путем потирания ее салфеткой. Все эти эксперименты можно воспроизвести, заменив электризованную основу электретом (например, парафиновым диском или пластинкой из карнаубского воска).

Преимущества использования электризованного пенополистирола или пластинки из ПВХ в качестве основы электрофора: очень легко получить эти пластины и просто электризовать их трением. Недостатки: эти пластины разряжаются за несколько минут. Затем необходимо время от времени потирать пластину, чтобы продолжить эксперименты. Преимущество использования электретной основы: она остается наэлектризованной в течение нескольких дней или месяцев, очень медленно теряя свою электризацию. Недостатком является то, что производство электретов не такое простое дело.

13.7 Стивен Грей, электреты и длительное сохранение электризации тел

Производство и некоторые основные свойства электретов были впервые описаны Стивеном Греем, который изложил свои открытия в важной статье 1732 года.[9] В той же работе он впервые описал процедуру сохранения электризации тел в течение очень долгого времени.

[9] [Grad], [Bos11, Глава 8] и [BAC12, Глава 9].

Дюфе описал эти открытия Грея следующими словами:[10,11]

> Г-н Грей обнаружил два новых свойства электричества: первое, что оно является постоянным, а именно, что оно может сохраняться в телах в течение очень долгого времени после возбуждения, и другое, что оно может возникнуть в некоторых случаях без трения тел.

Здесь мы приводим некоторые основные моменты этой чрезвычайно важной работы Грея, с нашими словами в квадратных скобках и в сносках:

Письмо мистера Стивена Грея к доктору Мортимеру, Секр. К.О., содержащее дальнейшее изложение его экспериментов, касающихся электричества

Charter-House, 7 июня 1732 г.

Сэр,

Со времени моей последней [статьи в *Философских трудах*] (№ 422)[12], где я привел отчет о моих экспериментах, показывающих, что вода будет притягиваться электрическими телами [то есть электризованными изоляторами], и что ей может быть передано электрическое свойство так, что она привлекает твердые тела, я провел другое исследование: Нельзя ли найти способ сохранения этого свойства тел электрически притягивать на более длительное время? Насколько я преуспел в этой попытке, будет видно из экспериментов, которые я провел с несколькими телами, упомянутыми в следующем каталоге;[13] и поскольку все они были приготовлены одинаковым образом, за исключением № 18 и 19, которые будут описаны позже, достаточно привести общее описание способа их приготовления и сохранения в состоянии притяжения.

Тела, на которых проводились эксперименты, были канифоль черного и белого цвета, каменная смола, шеллак или камедь, пчелиный воск и сера. Я приобрел три железных ковша различных размеров, в которых я плавил эти вещества, используя то, что мне показалось наиболее удобным для того количества, которое я задумал расплавить. Когда любое из этих тел было расплавлено, оно было снято с огня и оставлено на время, чтобы оно охладилось и затвердело в ковше; затем оно было возвращено к огню, где оно оставалось до тех пор, пока не растаяло по дну и по бокам ковша, чтобы стать подвижным; так что, перевернув ковш, оно могло быть извлечено; имеющая форму почти сечения сферы, выпуклая поверхность, как и плоская, будучи естественно (если можно так выразиться) полированным, за исключением серы, которая остывает без сохранения своей полировки, за исключением случаев, когда она отливается в стеклянных сосудах, как будет показано в дальнейшем. Теперь я перейду к экспериментам

[10] [DF34, стр. 341].

[11] M. Gray a trouvé dans l'électricité deux propriétés nouvelles, l'une qu'elle est permanente, c'est-à-dire, qu'elle peut subsister dans les corps très-long-temps après qu'elle y a été excitée, & l'autre qu'elle s'y trouve dans certains cas sans que les corps ayent été frottés.

[12] [Grab], [Bos11, глава 7] и [BAC12, глава 8].

[13] Этот каталог представлен на стр. 273 этой книги.

и наблюдениям, проведенным на этих электрических телах [то есть на этих изоляторах].

Когда любое из них было извлечено из ковша и его выпуклая поверхность затвердела, не было никакого притяжения, пока тепло не уменьшилось, то есть пока тело не остыло до определенной степени, а затем возникло небольшое притяжение; тепло при этом, по моим оценкам, было почти такое же, как у только что снесенного куриного яйца: Увеличение притяжения таково, что в холодном состоянии, притяжение как минимум в десять раз дальше, чем вначале.

Таблица 13.3: *КАТАЛОГ нескольких* электрических тел [то есть изоляторов] *упомянутых в текущем обсуждении.*

N°	Название вещества или тела	Вес		Месяц	День
		Унции	Драхмы		
1	Качественная черная канифоль	2	0	*Янв.*	31
2	Твердая смола и черная канифоль	2	2	*Янв.*	31
3	Качественная канифоль и пчелиный воск	2	1	*Фев.*	1
4	Твердая смола	1	7	*Фев.*	1
5	Твердая сера	3	6	*Фев.*	4
6	Шеллак	10	0	*Фев.*	10
7	Качественная черная канифоль	10	4	*Фев.*	11
8	Бесс-воск и канифоль	9	0	*Фев.*	12
9	Канифоль 4 [*части*], и гам-лак 1 *часть*	10	0	*Фев.*	12
10	Сера	18	0	*Фев.*	15
11	Твердая смола	10	12	*Фев.*	16
12	Черная канифоль	23	0	*Фев.*	23
13	Белая канифоль	7	12	*Фев.*	25
14	Гам-лак	11	14	*Фев.*	26
15	Гам-лак и черная канифоль *ana*	9	12	*Фев.*	26
16	Гам-лак 4 *части*, канифоль 1 *часть*	17	8	*Фев.*	28
17	Шеллак, Качественная черная канифоль *ana*	28	4	*Мар.*	2
18	Цилиндр из твердой серы	19	4	*Мар.*	20
19	Большой конус из твердой серы	30	0	*Мар.*	29
20	Лепешка из серы	11	4	*Апр.*	29

Грей не объяснил, чем он руководствовался при выборе именно этих конкретных материалов. Он также не уточнил, почему он ожидал, что они будут наэлектризованы этой процедурой. В любом случае он был проницательным наблюдателем. С 1708 года он проводил электрические эксперименты. В 1729 году он открыл проводники и изоляторы, осознав, что после потирания стеклянной трубки пробка на конце трубки начала притягивать к ней легкие тела. Эта деталь привлекла его внимание. Если бы он потер пробку, держа ее голой рукой, пробка не получила бы свойство притягивать к себе легкие тела.[14] Проведя эти эксперименты, он обнаружил, что электрическую силу (или свойство притягивать легкие тела) можно передавать некоторым веществам, которые не натирались, но находились в контакте с электризованной стеклянной трубкой. Эти вещества в настоящее время на-

[14]Приложение B в [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

зываются проводниками. Другие вещества, называемые теперь изоляторами, не допускали утечки и рассеивания электрической энергии через землю. В своих опубликованных работах он описал следующие изоляторы: шелковые нити, лески из конского волоса, лепешка из смолы, подогретое стекло, лепешка из пчелиного воска, сера и шеллак. Возможно он случайно заметил, что некоторые из этих смол и восков были наэлектризованы, *без предварительного трения*, так как они притягивали легкие тела, расположенные рядом с ними. А может он подозревал, что некоторые из этих материалов наэлектризовались в процессе их плавления. Эта статья 1732 года возможно является систематическим исследованием этого случайного наблюдения. Материалы, описанные Греем в этой статье, оставались наэлектризованными в течение очень длительного времени, без всякого предварительного натирания. В наши дни их называют электретами. Они могут быть наэлектризованы процедурой Грея или другими современными средствами электризации. Он был первым, кто предложил способ производства электретов и список материалов, которые могли бы стать электретами.

В продолжение этой статьи Грей представил еще одно очень важное открытие, а именно процедуру увеличения интервала времени, в течение которого тело может оставаться наэлектризованным:[15]

> Метод сохранения их способности притяжения заключался в том, чтобы обернуть их в любую вещь, которая отделяла бы их от внешнего воздуха; сначала для меньших тел я использовал белую бумагу, а для больших белую фланель; но потом обнаружил, что чёрные камвольные чулки тоже подойдут. Покрытые таким образом, они были помещены в большую еловую коробку, чтобы там оставаться, пока у меня не будет возможности использовать их.
>
> Цилиндр из серы, № 18, был получен путем плавления серы и выливания в цилиндрический стеклянный сосуд, который был предварительно нагрет, чтобы предотвратить его растрескивание. Когда сера затвердела, она стала несколько меньше, чем стекло; так что, перевернув стекло, она выпала легко и имела полированную поверхность, почти такую же гладкую, как стекло, в котором она была отлита. Большой конус из серы, № 19, был получен тем же способом; *а именно*, отлит в большом стакане для питья.
>
> Теперь я должен рассказать о наблюдениях, сделанных с некоторыми из тел, упомянутых в Каталоге, но сначала должен дать описание Каталога. Первый столбец содержит номер, который на листочке бумаги закреплен на каждом из тел; название которого приводится во втором столбце, независимо от того, являются ли они простыми или составными веществами. Третий столбец показывает, какой вес они имели при расплавлении, в унциях и драхмах веса.[16] В четвертом столбце указаны дни месяца, когда тело было расплавлено и получило свою форму, и, следовательно, когда оно впервые получило способность притягивать.

[15] [Grad], [Bos11, Глава 8] и [BAC12, Глава 9].

[16] 1 *ounce* = (1/16) *pound* ≈ 28.35 *g*, тогда как 1 *drachm* = (1/16) *ounce* = (1/256) *pound* ≈ 1.772 *g*.

В течение тридцати дней я продолжал наблюдать за каждым из этих тел и обнаружил, что в конце указанного времени они притягивали так же энергично, как и в первый или второй день, и как они это делают сейчас при написании этих строк. Вычитание указанного в Каталоге времени из любого другого последующего времени, покажет, как долго любое из тел сохраняло свойство притягивать; из этого следует, что некоторые из них не потеряли это свойство в течение более четырех месяцев:[17] Так что у нас есть некоторое основание полагать, что мы теперь открыли, что существует *перманентная притягивающая сила* во всех электрических телах [то есть во всех наэлектризованных изоляторах], без необходимости возбуждения потиранием, ударами и т. д., или любым другим воздействием. Но это также будет видно из отчета, который я сейчас приведу, для двух последних тел, упомянутых в Каталоге. Конус из серы, № 19, который был отлит в большом стакане, примерно через два часа после того, как его вынули из стекла, притягивал, и стакан тоже притягивал, но на небольшом расстоянии. На следующий день сера была извлечена из стекла, и тогда она сильно притягивала, но теперь уже не было ощутимого притяжения стеклом. Затем конус из серы был установлен своим основанием на крышке елового ящика, в котором лежали другие электрические тела, и покрыт стеклом. Затем я проверял его каждый день, и каждый раз убеждался, что он все еще притягивает; но, найдя его местонахождение не очень удобным, поскольку приходилось часто заглядывать в коробку, я убрал его к столу, стоящему между двумя окнами моей комнаты, где он продолжал находиться до сих пор, и всякий раз, когда снимал стекло, он притягивал на таком же большом расстоянии, как сера, которая была обернута и хранилась в вышеупомянутой ко-

[17]Это письмо датировано 7 июня 1732 года. Судя по этому абзацу, кажется, что каталог на странице 273 этой книги относится к 1732 году, так как Грей упомянул, что некоторые вещества не утратили своей привлекательной силы более четырех месяцев (то есть с 31 января 1732 года, когда тело было расплавлено, до 07 июня 1732 года, когда статья была написана). Дюфе, с другой стороны, при обсуждении этой работы полагал, что эти тела сохраняют свою привлекательную силу в течение полутора лет, [DF34, стр. 342]:

> Мистер Грей обернул эти разные тела бумагой, фланелью или любым другим подобным материалом, и таким образом они сохраняли свое электричество в течение нескольких месяцев, вплоть до момента написания, который имел место примерно через полтора года после его первых экспериментов.

Текст в оригинале:

> M. Gray enveloppoit alors ces différents corps dans du papier, dans de la flanelle, ou dans toute autre matiére semblable, & ils y ont conservé leur électricité pendant plusieurs mois, & même jusqu'au temps qu'il écrit, qui étoit environ un an & demi après ses premiéres expériences.

Нам кажется, что Дюфе интерпретировал Каталог как относящийся к 1731 году. Вероятно, это толкование было связано с тем, что 37-й том *Философских докладов* относился к 1731-1732 годам.

В любом случае, независимо от того, какая интерпретация является правильной, можно уверенно утверждать, что Грей смог сохранить электризацию этих тел в течение длительного времени длиной не менее 4 месяцев.

> робке. И хотя поначалу не было никакого притяжения, когда стекло было снято, я теперь обнаружил, что в хорошую погоду стекло также притягивает, но не на таком большом расстоянии, как сера, которая никогда не перестает притягивать в отсутствие ветра и изменения погоды, как все остальные тела, упомянутые в каталоге; только в сырую погоду притяжения не имеют места на таком большом расстоянии, как в хорошую погоду.
>
> Образец № 20 – лепешка серы, которая была расплавлена; как и другие тела, она приняла форму выпуклого участка сферы. После охлаждения, ее положили плоской стороной вниз на одном столе с конусом серы: оба они были расположены так близко к стене, чтобы солнце не светило на них. Это было, как показано в Каталоге, 18-го *апреля*;[18] и хотя она не была покрыта ничем, притягивает с тех пор. И в этом случае, как и в других телах, притяжение будет зависеть от погоды; но, в лучшем случае, сила притяжения не превышает десятой части той, с которой притягивает покрытый конус из серы.
>
> Эти притяжения лучше всего наблюдать, держа в одной руке притягивающее тело, а в другой – тонкую белую нить [19], привязанную к концу палки; тогда притяжение будет восприниматься в гораздо меньше степени, чем при использовании листочков латуни. Когда нить удерживается на максимальном расстоянии, она может притягиваться; движение ее сначала очень медленное, но неуклонно ускоряется по мере приближения к притягивающему телу.
>
> Предмет теперешних моих исследований – постоянное притяжение в стекле, а затем в других телах, но еще не завершил эти эксперименты, ввиду вынужденных перерывов из-за погоды.
>
> [...]

Из этого описания можно заключить, что Грею удалось увеличить количество времени, в течение которого тело сохраняло электризацию, двумя способами. Один способ – завернуть наэлектризованное тело в бумагу, фланель или другие подобные материалы. Другой способ заключался в том, чтобы покрыть их в контейнере, где они расплавлялись или затвердевали.

В случае когда контейнер был сделан из стекла, Грей обнаружил, что не только смола притягивала расположенные рядом с ними легкие тела, но и само стекло было наэлектризовано. Легко обнаружить электризацию контейнера, в котором диэлектрическое тело было расплавлено или затвердело, если он изготовлен из изоляционного материала, как стекло. В этом случае контейнер можно заземлить или трогать руками без потери приобретенного электричества. С другой стороны, когда этот контейнер сделан из такого проводящего материала, как металл, труднее узнать, был ли он наэлектризован во время производства электрета внутри него. Чтобы обнаружить его электризацию, контейнер должен быть изолирован от земли

[18] В каталоге упоминается апрель *29*.

[19] Возможно, эта была хлопковая или льняная нить. Эти материалы ведут себя как проводники в обычных экспериментах по электростатике. Грей использует здесь свою подвесную нить, см. Раздел 2.5.

до и после приготовления электрета. Затем вы можете проверить его заряд после удаления электрета.

В разделе 13.2 мы показали несколько экспериментов, в которых наэлектризованные соломки оставались заряженными в течение нескольких месяцев. Единственным требованием было завернуть их в бумажную салфетку, хлопковую фланель или пластиковый пакет, чтобы исключить контакт с внешним воздухом. Хотя это были чрезвычайно простые эксперименты, мы не находим процедур, подобных им, в учебниках, посвященных электричеству. В любом случае, это замечательный факт. В открытом воздухе натертая соломка теряет свою электризацию через несколько минут или через час. С другой стороны, если ее завернуть в бумажную салфетку или в пластиковый пакет, она может оставаться наэлектризованным в течение примерно 3 месяцев или даже дольше.

Чтобы дать представление о порядке величины, предположим, что заряженная соломка остается наэлектризованной в течение 10 минут при хранении в открытом воздухе. Кроме того, предположим, что она остается наэлектризованным в течение 3 месяцев, когда упакован в полиэтиленовый пакет. Интервал времени, в течение которого она остается наэлектризованным, мы увеличили почти в 13 000 раз, просто завернув ее! Удивительно, как такая простая процедура может иметь такой большой эффект.

Вдохновение попробовать эту процедуру пришло к нам непосредственно из этой фундаментальной статьи Грея, которая была опубликована в 1732 году, где он использовал эту технику со своими электретами.

13.8 Разработка и применение электретов

Электреты, разработанные Греем, были изучены также Дюфе и рядом других ученых. Однако этот предмет долгое время оставался в рамках простого научного любопытства. В 1885 году Хевисайд представил теоретическую схему для производства электретов внутри высоковольтного конденсатора.[20] Однако только в 1920-х годах Момотаро Эгучи получил некоторые электреты, по существу следуя этой схеме с использованием смеси карнаубского воска и смолы.[21]

Фукада описал эксперименты Эгучи и продолжительность электризации его электретов следующим образом:[22]

> Оригинальные электреты, т. е. постоянно заряженные диэлектрики, были приготовлены Эгучи в 1924 году с использованием смеси карнаубского воска и смолы [1].[23] Электрическое поле порядка 1,5 МВ/м

[20] [Hea87, Статья 30: Электромагнитная индукция и ее распространение, раздел 12: Электризация и электрификация. Естественные электреты, стр. 491-2], [JW80] и [Sil10b, стр. 20-22].

[21] [Egu25], [Mas87] и [Sil10b].

[22] [Fuk00].

[23] [1] Eiichi FukadaEiichi Fukada и M. Eguchi, «О постоянном электрете», Фил. Жур., Том 49, стр. 178-192, 1925. [Хотя ссылка [1] на статью Фукады представляет авторов в том виде, в котором они здесь написаны, эта работа была написана только Эгучи, [Egu25].]

> было приложено к расплавленной смеси при температуре около 130° С. Диск из электрета, изготовленного из карнаубского воска и смолы, диаметром 20 см и толщиной 1 см, хранится в Музее науки в Токио. Его поверхностные заряды сохранились в течение 45 лет с момента приготовления и, согласно наблюдениям, составляют примерно одну седьмую от первоначального значения [2].[24]

С тех пор электреты производились с помощью многих различных методов и технологических процессов. Их обычно классифицируют в соответствии с технологией производства.

Электреты получили широкое применение в различных областях измерительной и бытовой техники:

- Электризованное основание электрофора.
- Микрофоны.
- Наушники и динамики.
- Радиационные детекторы.
- Дозиметры.
- Фотокопировальные машины или электрофотография.
- Запоминающие устройства или электростатическая запись.
- Детекторы влажности.
- Электростатические батареи.
- Воздушные фильтры.
- Вибродетекторы.
- Детекторы давления.
- Электростатические моторы.
- Генераторы тока.
- Генераторы напряжения.
- Фигуры Лихтенберга.
- и т. д.

Электреты остаются активной областью исследований. Можно привести ряд ссылок по этой теме.[25]

---

[24] [2] Т. Такамацу и И. Сумото, «Время жизни электретов из карнаубского воска», Рикен Хококу, том 45, стр. 141-148, 1969 (на японском).

[25] [Net94], [Gro54], [Jef59], [Jef73, Глава 9: Электретные двигатели], [JW80] , [Ses87], [Fer00], [MWW07], [MW08], [Sil10b] и [GB17, Глава 7: Избыточный заряд в твердых телах: электреты].

Глава 14

Таинственные неэлектростатические силы

14.1 Электростатическая или кулоновская сила

Шарль Огюстен де Кулон получил в 1785 году закон для силы взаимодействия между двумя наэлектризованными телами. Он представил свои результаты в двух статьях 1785 года, опубликованных в 1788 году.[1] Он называл эти наэлектризованные тела разными именами, а именно, "электрические массы", "электрические молекулы", "электризованные молекулы" или "плотности электрических жидкостей".[2]

В случае тел, наэлектризованных зарядами одного знака, Кулон высказался следующим образом:[3]

Основной закон электричества

> *Сила отталкивания между двумя маленькими сферами, заряженными одним и тем же видом электричества, находится в обратном отношении квадратов расстояний между центрами двух сфер.*

Для тел, наэлектризованных зарядами противоположных знаков, Кулон заключил, что:[4]

> Таким образом, мы пришли с помощью метода, совершенно отличного от первого, к аналогичному результату; поэтому мы можем заключить, что взаимное притяжение электрической жидкости, которая называется положительной, и электрической жидкости, которая

[1] [Cou85a], [Cou85b], [Pot84] и [Cou35].
[2] [Gil71b] и [Gil71a, стр. 190-192].
[3] [Cou85a, стр. 572], [Pot84, стр. 110] и [Cou35].
[4] [Cou85b, стр. 572], [Pot84, стр. 123] и [Cou35].

> обычно называется отрицательной, находится в обратном отношении к квадрату расстояний; точно так же, как мы обнаружили в нашем первом мемуаре, что взаимное действие электрического флюида того же рода находится в обратном отношении к квадрату расстояний.

До сих пор Кулон упоминал только то, как электрическая сила изменялась с расстоянием между наэлектризованными телами. Только в последнем разделе своего второго мемуара, когда он изложил основные положения своих исследований, он упомянул, что эта сила пропорциональна произведению между плотностями электрической жидкости двух наэлектризованных тел (или пропорциональна произведению двух зарядов, как обычно говорят):[5]

> Конспект главных тем, затронутых в этом мемуаре
>
> Из вышеизложенных исследований следует, что:
>
> 1. Электрическое действие, будь то отталкивающее или притягивающее, двух электризованных сфер и, следовательно, двух электризованных молекул, прямо пропорционально произведению плотностей электрической жидкости двух наэлектризованных частиц и обратно пропорционально квадрату расстояний; [...]

Гиллмор правильно отметил, что Кулон не дал экспериментального доказательства , что электрическая сила пропорциональна произведению зарядов.[6] Он только подразумевал или предполагал эту пропорциональность, хотя и не считал важным продемонстрировать этот результат экспериментально. С тех пор в литературе были разные точки зрения на эту тему.[7] Некоторые авторы утверждают, что интенсивность электрической силы *по определению* пропорциональна произведению двух зарядов (то есть количество заряда в теле будет определяться величиной силы, которую он произвел). Другие авторы утверждают, что мы можем определять и измерять заряд независимо от определения и измерения силы. Если это так, то пропорциональность между электрической силой и произведением двух зарядов может быть получена *экспериментально*.

Эта электростатическая сила очень похожа на гравитационную силу, которую Ньютон представил в своей книге *Математические основы натуральной философии*, обычно известной под своим первым латинским названием *Principia*.[8] Эта книга была первоначально опубликована в 1687 году. Обе силы действуют вдоль прямой линии, соединяющей взаимодействующие тела, они подчиняются принципу действия и противодействия, и меняются как обратный квадрат расстояния между частицами. Кроме того, в то время как электрическая сила находится в прямой зависимости от произведения величины двух зарядов, гравитационная сила пропорциональна

[5] [Cou85b, стр. 611], [Pot84, стр. 146] и [Gil71a, стр. 190-191].
[6] [Gil71b] и [Gil71a, стр. 190-192].
[7] [BW13].
[8] [New34], [New52], [New90], [New99], [New08] и [New10].

произведению взаимодействующих масс. Похоже, что Кулон пришел к своему закону для электрической силы больше по аналогии с законом тяготения Ньютона, чем на основе своих сомнительных измерений с крутильными весами.[9]

Определение 14.1

Фундаментальное взаимодействие, характеризующее электрические явления для зарядов в состоянии покоя, называется *электростатической силой*, *кулоновской силой*, *силой Кулона* или *законом Кулона.* Частицы, наэлектризованные зарядами одного знака, отталкивают друг друга, а частицы, наэлектризованные противоположными зарядами, притягивают друг друга. Эта сила пропорциональна произведению величины зарядов в двух телах, изменяясь как обратный квадрат их расстояния (предполагая, что размеры тел малы по сравнению с расстоянием между ними). Эта сила следует принципу действия и противодействия и направлена вдоль прямой линии, соединяющей взаимодействующие частицы.
Так называемые *неэлектростатические силы* или *некулоновские силы* – это силы, действующие на наэлектризованные частицы, но не подчиняющиеся закону Кулона.

В 1822 году Андре-Мари Ампер (1775-1836) ввел в обиход выражения *электростатический* и *электродинамический.*[10]

Неэлектростатические силы необходимы для поддержания набора электризованных тел в состоянии покоя относительно друг друга в устойчивом равновесии. Неэлектростатические силы также необходимы для отделения противоположно электризованных частиц, как в янтарном эффекте. Они также присутствуют в резистивных цепях с постоянными токами[11] и в некоторых других ситуациях. В этой главе представлены некоторые явления, которые требуют существования сил неэлектростатического происхождения.

14.2 Неэлектростатические силы в конфигурациях устойчивого равновесия

Самуэль Эрншоу (1805-1888) доказал в 1842 году, что система тел не может оставаться в покое относительно друг друга в устойчивом равновесии под действием исключительно центральных сил, меняющихся как обратный квадрат расстояния между телами.[12] В природе, с другой стороны,

[9] [Hee92].

[10] [Amp22a, с. 60], [Amp22c, примечание на с. 200], [Amp22b, примечание на с. 237], [Amp85b, примечание к с. 239], [Amp85a, примечание на с. 192], [Blo82, с. 78], [Cha09, Раздел 1.3], [AC11, Раздел 1.4] и [AC15, Раздел 1.4].

[11] [AH07], [AH09] и [AH13].

[12] [Ear42], [Max54a, статья 116, с. 174-176] и [Sco59].

существует системы, в которых взаимодействующие электризованные тела остаются в покое относительно друг друга в устойчивом равновесии. Следовательно, во всех этих ситуациях силы неэлектростатического происхождения необходимы для уравновешивания электростатических сил и обеспечения устойчивости системы.[13]

Предположим, сферический проводник C отрицательно наэлектризован и изолирован от земли. Например, его можно зарядить, соскабливая натертую пластиковую линейку по его поверхности, или методом ПКО, прикоснувшись к натертой соломке. Заряды на проводнике отталкивают друг друга. В равновесии они остаются равномерно распределенными по его поверхности, Рис. 14.1.

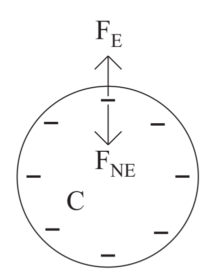


Рис. 14.1: Сферический проводник C равномерно электризован. Мы показываем суммарную отталкивающую электростатическую силу F_E, действующую на верхний отрицательный заряд со стороны всех других отрицательных зарядов, и силу неэлектростатического происхождения, F_{NE}, ответственную за удержание этого верхнего заряда в покое на поверхности сферы.

Рассмотрим отрицательно наэлектризованную частицу, расположенную в верхней части сферы. Она отталкивается от всех остальных отрицательно заряженных частиц. Поэтому на нее действует вертикальная электростатическая сила F_E, направленная в сторону от центра сферы. Сила неэлектростатического происхождения, направленная вниз, F_{NE}, имеющая ту же интенсивность, что и сила F_E, необходима для того, чтобы эта отрицательная частица находилась в покое на поверхности сферы. В этой конкретной ситуации эту неэлектростатическую силу иногда называют контактной силой. Но ее происхождение до конца не понято. Мы также не знаем, как она генерируется.

Хейлброн отмечал загадочность силы, которая предотвращает утечку электрических жидкостей с поверхности проводников.[14]

Та же самая ситуация возникает, когда проводящая сфера заряжена положительно, Рис. 14.2 (a). Те же рассуждения верны и для изолирующей

[13] See [VF80], [CS02, Section 18.7], [AH07, Раздел 5.3 и Приложение A], [AH09, Раздел 5.3 и Приложение A], [AH13, Раздел 5.3 и Приложение A], [AC11, Раздел 2.4], [AC15, Раздел 2.4], вместе с разделами 7.8 и 7.9 из [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

[14] [Hei99, стр. 499-500].

сферы, которая равномерно электризована отрицательно или положительно, Рис. 14.2 (b) и (c).

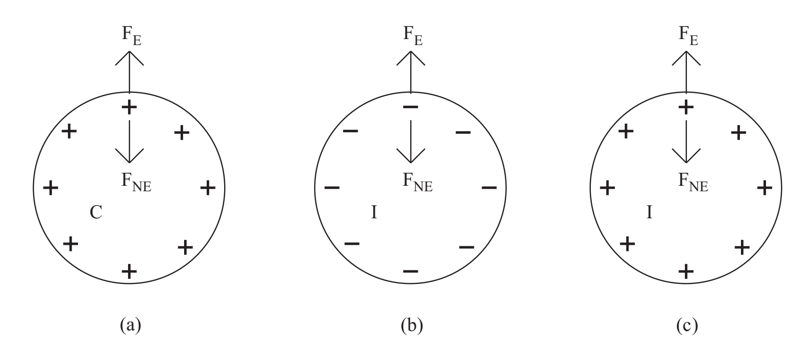


Рис. 14.2: (a) Проводящая сфера C положительно электризована. (b) Изолирующая сфера I отрицательно электризована. (в) Изолирующая сфера I положительно электризована.

На этом рисунке F_E представляет суммарную электростатическую силу, действующую на верхнюю наэлектризованную частицу в результате электростатического отталкивания, создаваемого другими наэлектризованными частицами на поверхности сферы, где она расположена. Мы обозначили через F_{NE} силу неэлектростатического происхождения, действующую на верхнюю наэлектризованную частицу и удерживающую ее в покое на поверхности сферы. Когда электризованная сфера находится в равновесии, F_{NE} имеет ту же величину, что и F_E, но указывает в противоположном направлении.

Другая конфигурация устойчивого равновесия имеет место, когда проводник, изолированный от земли, поляризован присутствующим рядом электризованным телом. Предположим, что соломка отрицательно электризуется трением о волосы. Поднесите ее ближе к изолированному проводнику. Проводник становится поляризованным из-за наэлектризованной соломки, Рис. 14.3.

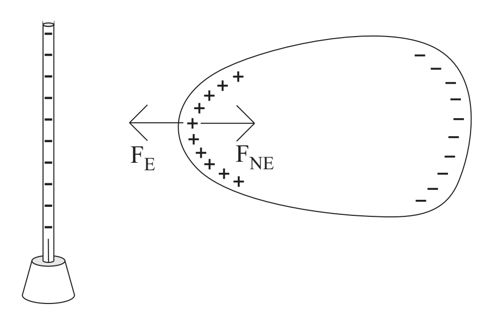


Рис. 14.3: Проводник поляризован соседней отрицательно заряженной соломкой.

На Рис. 14.3 мы обозначили через F_E суммарную электростатическую силу, действующую на положительно электризованную частицу, расположенную на левом конце проводника. Она является результатом притяжения, создаваемого отрицательными зарядами соломки, а также электростатическими силами, действующими на эту частицу со стороны всех других наэлектризованных частиц на поверхности этого проводника. В равновесии эта частица остается в покое. Это равновесие может иметь место только при наличии другой силы, действующей на эту положительную частицу, а именно, сила неэлектростатического происхождения, представленная здесь как F_{NE}. В равновесии эти две силы имеют одинаковую величину, но направлены в противоположные стороны.

Теперь рассмотрим изолятор, расположенный рядом с отрицательно заряженной соломкой. Каждая молекула изолятора поляризуется – положительно в области, близкой к соломке, и отрицательно в области, удаленной от соломки, Рис. 14.4 (a).

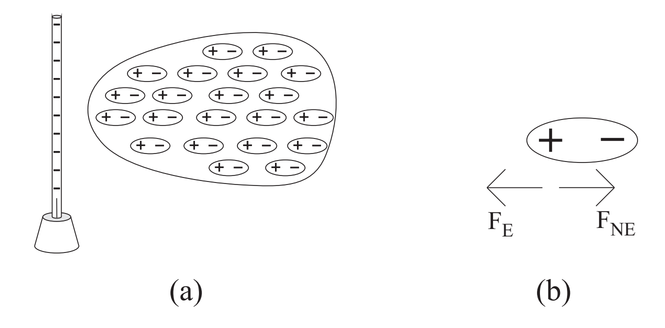


Рис. 14.4: (a) Изолятор поляризован соседней отрицательной соломкой. (b) Электростатические и неэлектростатические силы, F_E и F_{NE}, действующие на положительный конец конкретной поляризованной молекулы изолятора.

На Рис. 14.4 (b) мы видим одну молекулу этого поляризованного изолятора, которая находится ближе всего к соломке. Мы обозначили F_E и F_{NE} суммарные электростатические и неэлектростатические силы, соответственно, действующие на положительный конец этой поляризованной молекулы. Электростатическая сила создается отрицательными зарядами соломки, отрицательным концом этой молекулы, а также всеми другими поляризованными молекулами этого изолятора. Электростатическая сила F_E направлена в сторону отрицательной соломки. В равновесии положительный конец этой молекулы остается в покое. Поэтому, чтобы уравновесить F_E, нам нужна сила неэлектростатического происхождения, F_{NE}. В равновесии обе силы имеют одинаковую величину, но указывают в противоположных стороны.

То есть, чтобы предотвратить движение наэлектризованных частиц в телах на рисунках 14.1 и 14.2, нам нужны неэлектростатические силы, противостоящие силе Кулона. Нам также нужны неэлектростатические силы для проводников или изоляторов, которые поляризованы соседними наэлек-

тризованными телами, как на рисунках 14.3 и 14.4. Без этих неэлектростатических сил, устойчивое равновесие наэлектризованных и/или поляризованных частиц было бы невозможно.

Возможны конфигурации зарядов, где на все частицы системы действуют нулевые суммарные электростатические силы. Мы видим пример такой конфигурации на Рис. 14.5.

Рис. 14.5: Частицы A, B и C разделены расстоянием d по прямой, соединяющей их. Частицы A и C электризованы зарядом $-4q$, а частица B электризована зарядом q.

Предположим, что три точечные частицы A, B и C разделены расстоянием d по прямой. Частицы A и C одинаково наэлектризованы зарядом $-4q$, а частица B наэлектризована зарядом q. Электростатические силы, действующие на эти частицы, представлены на рисунке. 14.6.

Рис. 14.6: Электростатические силы, действующие на частицы.

В левой части рисунка 14.6 показана сила отталкивания F_{CA}, оказываемая C на A, и сила притяжения F_{BA}, оказываемая B на A. Согласно закону Кулона, эти две силы уничтожают друг друга. В центре рисунка 14.6 представлена сила притяжения F_{AB}, оказываемая A на B, и сила притяжения F_{CB}, оказываемая C на B. Согласно закону Кулона, эти две силы компенсируют друг друга. Справа на Рис. 14.6 показана сила притяжения F_{BC}, оказываемая B на C, и сила отталкивания F_{AC}, действующая на A на C. Эти две силы также взаимно сокращаются.

В принципе, эти три частицы могут оставаться в покое в инерциальной системе отсчета, поскольку результирующая сила, действующая на каждую из них равна нулю, Рис. 14.6. Следовательно, может показаться, что неэлектростатические силы в этом случае не требуются. Однако равновесие этой системы неустойчиво. Этот факт можно проиллюстрировать с помощью рисунка 14.7, где частица B немного смещена вправо, ближе к C, чем к A.

Когда частица B становится ближе к C по той или иной причине, сила притяжения между ними увеличивается. Аналогично, сила притяжения между A и B уменьшается из-за увеличения расстояния между этими частицами. Следовательно, суммарная сила, действующая на B, теперь направлена в сторону C. По той же причине суммарная сила, действующая

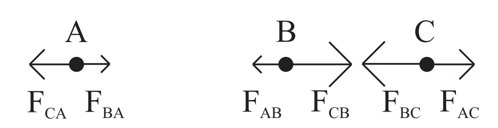


Рис. 14.7: Электростатические силы, действующие на частицы, когда B становится ближе к C.

на C, указывает на B. Сила, действующая на A, теперь направлена налево, то есть от пары BC. Предположим, что эти частицы могут свободно двигаться под действием этих электрических сил, начиная с конфигурации, показанной на Рис. 14.6. Если какое-либо внешнее возмущение сдвинет B слегка в направлении C, эти две частицы начнут двигаться навстречу друг другу. Частица A, с другой стороны, отойдет от пары BC. Эта система частиц тогда будет все дальше уходить от первоначальной конфигурации равновесия.

То есть, хотя конфигурация на Рис. 14.5 представляет собой равновесие, она нестабильна. Любое возмущение в этой системе приведет к ее разрушению. Этот пример иллюстрирует теорему Эрншоу. Поэтому, чтобы поддерживать эту систему из трех частиц в устойчивом равновесии, снова нужны силы неэлектростатического происхождения.

Хлорид натрия или поваренная соль является типичным ионным соединением в стабильном равновесии. Он имеет кубическую кристаллическую структуру, состоящую из ионов натрия и хлора, Na^+ и Cl^-. Наличие неэлектростатических сил необходимо для уравновешивания кулоновских сил, действующих на ионы.

14.3 Неэлектростатические силы в янтарном эффекте

Силы неэлектростатического происхождения также необходимы, чтобы отделить противоположно электризованные частицы друг от друга, как в янтарном эффекте. Прежде чем рассмотреть этот эффект, мы вспомним действие кулоновской силы на противоположно наэлектризованные тела.

Предположим, что проводник $C1$ положительно электризован с помощью заряда $+Q$, изолированного от земли, и проводник $C2$, отрицательно электризованный зарядом $-Q$, также изолирован. При контакте оба проводника нейтрализуются. Они остаются нейтральными после разделения, Рис. 14.8.

Подобный эксперимент был проведен в томе 1 этой книги.[15] В эксперименте были использованы два противоположно электризованных электроскопа, Рис. 14.9.

Предположим теперь, что I - электризованный по поверхности изолятор, как соломка, например, отрицательно наэлектризованная втиранием в

[15] Раздел 6.9 [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

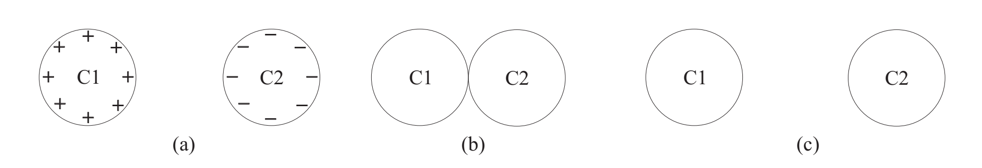


Рис. 14.8: (a) Проводящие сферы $C1$ и $C2$ отделены друг от друга и противоположно электризованы. (b) Нейтрализация сфер при их соприкосновении. (c) Сферы остаются нейтральными после разделения.

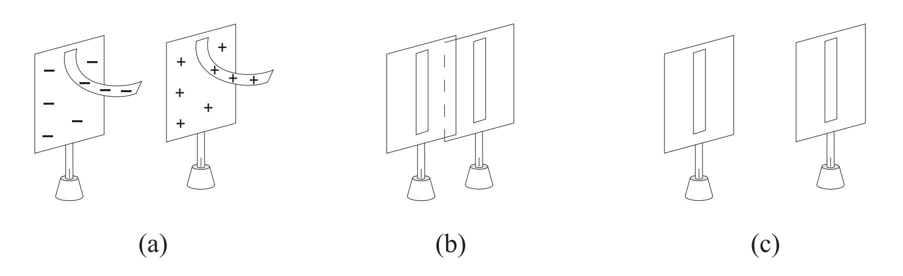


Рис. 14.9: (a) Положительный электроскоп и отрицательный электроскоп. (b) После контакта электроскопов полоски падают. (c) После разделения электроскопов полоски остаются в вертикальном положении, что указывает на то, что электроскопы теперь разряжены.

волосы или в бумажную салфетку. Как было показано в томе 1 этой книги, этот изолятор можно нейтрализовать, просто погрузив его в пресную воду в заземленной металлической чаше. После удаления его из воды изолятор нейтрализован, то есть он больше не притягивает к себе кусочки бумаги.[16] Рис. 14.10 иллюстрирует эту процедуру.

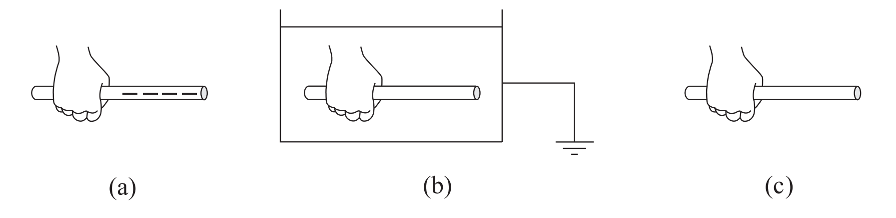


Рис. 14.10: (a) Пластиковая соломка с отрицательным зарядом. (b) Она погружается в пресную воду в заземленной металлической чаше. (c) После удалении из воды соломка становится электрически нейтральной.

Вода ведет себя как проводник в электростатических экспериментах. Она содержит свободные наэлектризованные частицы (заряженные ионы, H_3O^-, OH^- и многие другие наэлектризованные примеси), которые могут перемещаться в воде. Когда все части электризованной соломки вступают

[16] Раздел 7.14 из [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] и [Ass17].

в контакт с окружающей водой, солома нейтрализуется. Заряды, которые были распределены по ее поверхности, теперь распределяются через жидкость. Поскольку вода в этом эксперименте заземлена, эти заряды затем распределяются по всей Земле. Когда мы вытаскиваем солому из воды, обратите внимание, что она стала нейтральной. Она больше не может притягивать к себе маленькие кусочки бумаги.

Эта процедура показывает, что для нейтрализации изолятора, который наэлектризован вдоль его поверхности, вы можете погрузить его в проводящую жидкость, как вода, чтобы заземлить все точки вдоль поверхности изолятора.

Предположим теперь, что два изолирующих тела A и B электризованы противоположными зарядами $+Q$ и $-Q$, распределенными по их поверхностям. Эти заряды не могут свободно перемещаться вдоль этих тел, поскольку они являются изоляторами. Поэтому, чтобы нейтрализовать их, необходимо привести в контакт все противоположно заряженные точки. Теперь попробуем представить себе, что может произойти в этой идеализированной ситуации. Рис. 14.11 качественно иллюстрирует этот гипотетический процесс нейтрализации двух противоположно электризованных изоляторов с распределением зарядов по их поверхности. Мы не проводили реальных экспериментов, где нам удалось добиться нейтрализации этих двух тел с помощью процесса, описанного на рисунке.14.11.

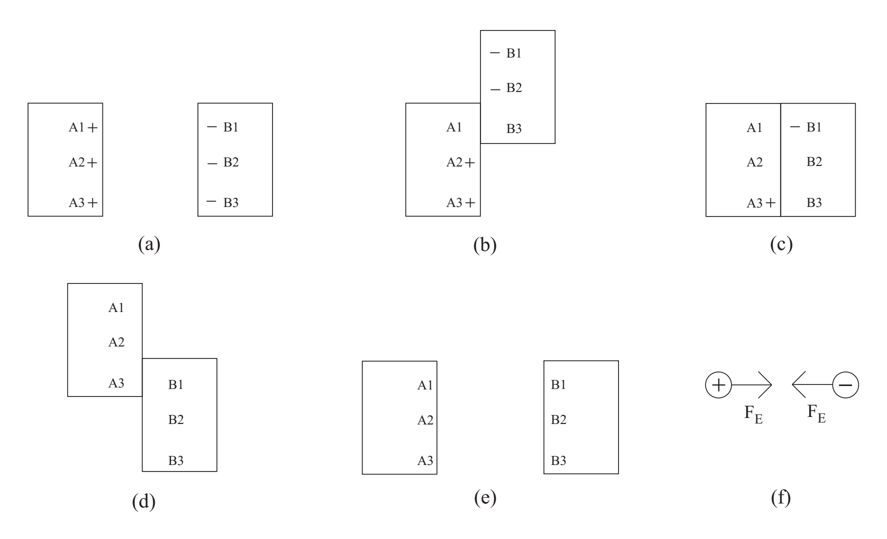


Рис. 14.11: (a) Гипотетическая нейтрализация двух противоположно электризованных изоляторов A и B. (b) Нейтрализация точек $A1$ и $B3$ во время их контакта. (c) Нейтрализация точек $A2$ и $B2$ во время их контакта. (d) Нейтрализация точек $A3$ и $B1$ во время их контакта. (e) Изоляторы остаются нейтральными после разделения. (f) Электростатические силы притяжения, F_E, действующие между противоположно электризованными частицами.

Рис. 14.11 (a) показывает изолятор A с тремя положительными заря-

дами, расположенными в точках $A1$, $A2$ и $A3$ его поверхности, а изолятор B имеет отрицательных заряды, расположенные в точках $B1$, $B2$ и $B3$ его поверхности. В (b) точки $A1$ и $B3$ касаются друг друга, нейтрализуя эти точки. В (c) точки $A2$ и $B2$ касаются друг друга, нейтрализуя эти точки. В (d) точки $A3$ и $B1$ касаются друг друга, нейтрализуя эти точки. В итоге мы имеем два нейтральных изолятора, когда они отделены друг от друга, Рис. 14.11 (e). На Рис. 14.11 (f) представлена электростатическая сила F_E, притягивающая противоположно заряженные частицы, когда они находятся близко друг к другу.

Теперь рассмотрим янтарный эффект. Разделение зарядов в данном эффекте происходит против действия кулоновской силы.

В янтарном эффекте имеет место нечто прямо противоположное процессу, представленному на Рис. 14.11. Пусть изоляторы A и B сделаны из разных материалов и изначально нейтральны. Потрите их друг против друга с относительной скоростью V. После разделения один из них положительно электризуется зарядом $+Q$, в то время как другой изолятор получает отрицательный заряд $-Q$. Рис. 14.12 иллюстрирует эффект янтаря.

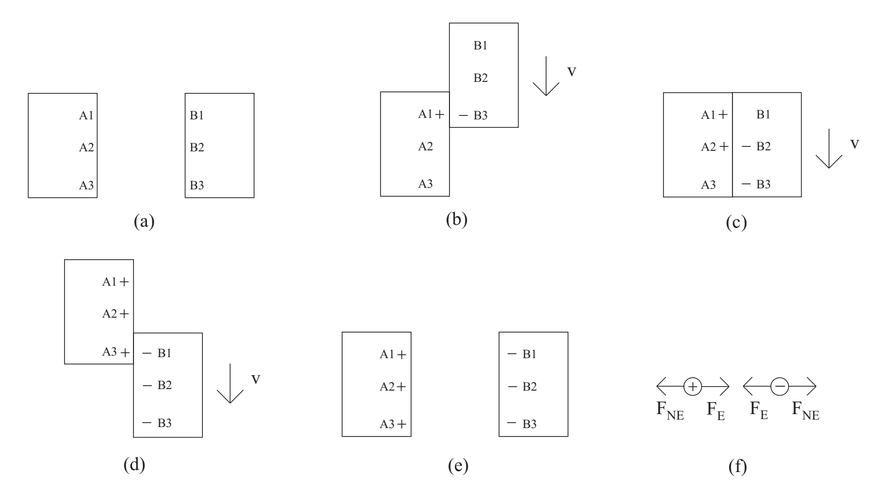


Рис. 14.12: Качественное представление янтарного эффекта. (a) Два изолятора A и B изначально нейтральны. С (b) по (d): Из-за трения между взаимодействующими поверхностями эти два тела наэлектризованы противоположными зарядами. (e) Конечная ситуация с двумя противоположно электризованными изоляторами. (f) Электростатические силы притяжения F_E, действующие между противоположно заряженными частицами, вместе с силами неэлектростатического происхождения F_{NE}, действующими между ними. Эти силы неэлектростатического происхождения ответственны за разделение зарядов в ситуациях (b) - (d).

Между двумя нейтральными частицами нет электростатических сил, в то время как две частицы, противоположно электризованные, притягивают друг друга с силой электростатического происхождения, F_E. В эффекте

янтаря мы начинаем с двух нейтральных изоляторов и заканчиваем двумя противоположно заряженными телами. Следовательно, такое разделение противоположных зарядов может происходить только под действием силы неэлектростатического происхождения, F_{NE}, действующей между противоположно заряженными частицами, когда они отделяются друг от друга. Сила F_{NE} пытается отделить противоположно заряженные частицы, в то время как электростатическая сила F_E пытается их объединить. Эти силы представлены на Рис. 14.12 (f). Кроме того, величина F_{NE} должна быть больше, чем величина F_E, в ходе разделения противоположно заряженных частиц трением в эффекте янтаря.

В заключение, электростатические силы могут объяснить гипотетическую нейтрализацию противоположно наэлектризованных изоляторов, представленных на Рис. 14.11. Однако эти электростатические силы, действующие в одиночку, не могут объяснить янтарный эффект. В конце концов, мы начинаем с двух нейтральных изоляторов и заканчиваем противоположно заряженными, Рис. 14.12. Следовательно, эффект янтаря требует наличия сил неэлектростатического происхождения, F_{NE}. Самое раннее и самое простое явление электричества требует существования этих сил, без них он невозможен.

14.3.1 Другие тайны янтарного эффекта

Хотя эффект янтаря является самым древним явлением, изученным в электричестве, с ним все еще связано несколько загадок. Мы точно не знаем происхождение неэлектростатической силы, вызывающей разделение зарядов при трении двух разных веществ. Мы также не знаем происхождение неэлектростатической силы, которая поддерживает заряды в покое на поверхности электризованных или поляризованных тел. Есть и другие аспекты этого эффекта, которые до сих пор покрыты тайной.

В большинстве учебников утверждается, что имеет место перенос электронов между двумя телами разной природы, которые подвергаются трению в эффекте янтаря – одно из них получает электроны, а другое теряет эти фундаментальные частицы. Однако, даже если электризация происходит посредством переноса электронов, механизм, ответственный за этот обмен частиц и действующий против силы Кулона, не совсем ясен.

Кроме того, действительно ли эффект янтаря (или трибоэлектризация) обусловлен переносом электронов? Это утверждение приводится в учебниках как общее заявление, но никаких подтверждающих его экспериментов не приводится.

Однако, когда мы читаем специальную литературу, написанную учеными, которые действительно проводят эксперименты по этой теме, мы понимаем, что все еще есть много сомнений и неопределенностей, связанных с фундаментальным процессом электризации, происходящим в эффекте янтаря. У. Р. Харпер в своей книге 1965 года *Контакт и фрикционная элек-*

тризация, например, пишет:[17]

> Ключевой вопрос для объяснения образования статического заряда заключается в том, происходит ли зарядка изоляторов в результате переноса электронов, ионов или того и другого. Монтгомери сказал бы, что носителями заряда являются *всегда* электроны, а Лоеб – что *обычно* это электроны, а Генри считает, что вопрос все еще остается открытым. Я придерживаюсь мнения, что теперь можно дать определенный ответ, который заключается в том, что электроны *никогда* не являются носителями в тех случаях, когда заряжаемый материал действительно является изолятором.

Я не знаю ответа на этот вопрос. Я просто привожу здесь несколько ссылок, в которых эта тема обсуждается с экспериментальной точки зрения.[18]

14.4 Неэлектростатические силы, действующие внутри батареи

В 1800 году Вольта опубликовал свое изобретение электрической стопки или батареи.[19] Он расположил ряд дисков в следующем порядке, снизу вверх: серебро, цинк, диск из увлажненного картона; серебро, цинк, диск из увлажненного картона и т. д. Соединив самый нижний диск из серебра с самым верхним диском из цинка металлической проволокой, он заметил, что постоянный ток течет через проволоку.

Рис. 14.13 схематически иллюстрирует химическую стопку или батарею.

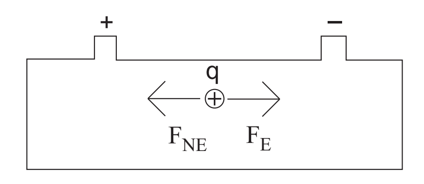


Рис. 14.13: Заряженная батарея с положительным и подвижным ионом q внутри нее.

Аккумулятор имеет положительную клемму $+$ и отрицательную клемму $-$. Мы также нарисовали частицу, наэлектризованную зарядом q внутри батареи. Она представляет собой ион, который может двигаться внутри батареи, то есть подвижную наэлектризованную частицу. Предположим, что q положительно. Тогда на него действует электростатическая сила F_E, направленная от положительного к отрицательному полюсу. Эта электростатическая сила стремится разрядить аккумулятор. То есть, если бы она

[17] См. [Bai01] и [Gal14].
[18] [Bai01], [Sch07], [MWW07], [MW08], [LB08], [LB09], [Wil12], [Gal14] и [GB17].
[19] [Vol00a], [Vol00b], [Vol64], [Mag06] и [MA08].

действовала одна, положительная частица q двигалась бы к отрицательному полюсу батареи, нейтрализуя ее. Однако батарею можно заряжать в течение многих дней, если ее клеммы не соединены металлическим проводом. Поэтому в ситуации равновесия, в которой батарея остается наэлектризованной несмотря на наличие в ней подвижных ионов, необходима сила неэлектростатического происхождения, F_{NE}. Когда через батарею не протекает ток, эти две силы, действующие одновременно на ион, F_E и F_{NE}, имеют одинаковую величину, но указывают в противоположных направлениях, Рис. 14.13.

Существует еще одна ситуация, показывающая необходимость существования силы неэлектростатического происхождения внутри батареи, а именно, когда она заряжается или электризуется. Поместите разбавленную серную кислоту в емкость из изолирующего материала. Эта кислота в целом электрически нейтральна, хотя в ней много положительных и отрицательных подвижных ионов. Рассмотрим две нейтральные пластинки – одну из цинка, а другую из меди. Цинковая пластина частично погружена в кислоту ближе к стенке сосуда, а медная пластина частично погружена в кислоту около противоположной стенки. Этот простой процесс электризует эти пластины зарядами разных знаков: цинк становится отрицательно наэлектризованным, а медь – положительно наэлектризованным. Такое разделение зарядов может иметь место только благодаря действию неэлектростатической силы. В конце концов, электростатические силы имеют тенденцию нейтрализовать противоположно заряженные тела. В этом конкретном примере, с другой стороны, мы начинаем с двух разных тел, цинка и меди, изначально нейтральных. В конце процесса один из них электризуется положительно, а другой – отрицательно. Этот механизм зарядки не может продолжаться бесконечно долго. Мы достигаем насыщения, при котором устанавливается постоянная разность потенциалов между цинковым и медным пластинами. В интервале времени, в течение которого разность потенциалов возрастала от нуля до значения насыщения, сила неэлектростатического происхождения, ответственная за разделение противоположные заряды, превышала электростатическую силу, которая препятствовала такому разделению.

Поэтому силы неэлектростатического происхождения действуют также в химических реакциях, протекающих на электродах батареи.

14.5 Неэлектростатические силы в цепях с постоянными токами

Когда резистивный металлический провод подключен к двум клеммам батареи, через замкнутый контур протекает постоянный электрический ток, как описано в разделе 3.4. Согласно закону Ома, разность напряжений или потенциалов между концами провода пропорциональна его сопротивлению и току, протекающему через него. Этот закон можно сформулировать и в

микроскопической форме. Металл имеет свободные электроны, которые могут двигаться относительно решетки металла. Согласно микроскопической версии закона Ома, электрическая сила, действующая на подвижный свободный электрон, уравновешивается резистивной силой, когда в цепи протекает постоянный ток. Эта сила сопротивления пропорциональна скорости электрона проводимости относительно решетки металла. Электрические и резистивные силы действуют в противоположных направлениях. Они одинаковы по величине, когда в цепи течет постоянный ток.

Электрическая сила обусловлена законом Кулона. Она действует на любой свободный электрон и является результатом распределения зарядов, расположенных на поверхности резистивного провода. Поверхностная плотность этих зарядов изменяется по длине резистивного провода, но является постоянной во времени величиной для постоянных токов. Электрическая сила проталкивает свободные электроны, создавая тем самым электрический ток.

С другой стороны, сила сопротивления, действующая на любой свободный электрон, имеет неэлектростатическое происхождение. Она пропорциональна скорости дрейфа электрона относительно решетки металла. Величина этой силы нарастает с увеличением скорости свободного электрона. Через очень короткое время после подключения провода к батарее, свободный электрон достигает постоянной скорости. В этой устойчивой ситуации сила сопротивления имеет ту же величину, что и электрическая сила, причем эти две силы действуют в противоположных направлениях. Эта сила сопротивления предотвращает неограниченное ускорение свободного электрона, создаваемого электрической силой.

Существует также сила неэлектростатического происхождения, действующая на подвижные отрицательные заряды, расположенные внутри батареи. Она продвигает их от положительной клеммы батареи к отрицательной. С другой стороны, электростатическая сила, действующая на отрицательную частицу, находящуюся внутри батареи, направлена от отрицательной клеммы к положительной.

Эти темы подробно обсуждались в нашей книге *Электрическая сила тока: Вебер и поверхностные заряды резистивных проводников, несущих установившиеся токи.*[20]

14.6 Неэлектростатические силы в других ситуациях

Есть несколько других механизмов, где, начиная с двух нейтральных тел A и B, можно получить положительную электризацию A и отрицательную электризацию B. Есть также много других процедур, в которых мы начинаем с одного нейтрального тела, изолированного от земли, и заканчиваем

[20][AH07], [AH09] и [AH13].

его поляризацией. Неэлектростатические силы являются обязательным элементом всех этих механизмов. Мы перечислим некоторые из них:

- Когда два разнородных металла находятся в контакте, один из них становится положительно электризованным, а другой отрицательно электризованным, с разностью потенциалов между ними. Этот эффект связан с тем, что разные металлы имеют разную работу выхода. Это так называемый эффект Вольта, разность потенциалов Вольта, разность внешних потенциалов или разность контактных потенциалов.[21]

- Контактная электризация (или контактное напряжение) в целом.[22] Например, в главе 5 мы обсуждали электризацию клейких лент.

- Электризация химическими реакциями. Есть различные процессы такого рода, которые являются предметом электрохимии.

- Термоэлектрический эффект, то есть прямое преобразование разности температур в электрическое напряжение. Термоэлектрическое устройство создает разность потенциалов между двумя сторонами с разными температурами.

- Пироэлектрический эффект, который не следует путать с термоэлектричеством. Некоторые кристаллы генерируют временное напряжение при нагревании или охлаждении. Когда температура всего материала меняется от одного значения к другому, на кристалле появляется временное напряжение.

- Пьезоэлектрический эффект, то есть разность потенциалов между двумя гранями материала, когда он механически сжимается или деформируется.

- Электризация под давлением, которую не следует путать с пьезоэлектричеством.[23]

- Фотоэлектрический эффект, то есть эмиссия электронов материалом, когда на материал попадает свет достаточно высокой частоты, которая зависит от вещества.

- Производство электретов. Они могут быть монополярными (с полным зарядом, отличным от нуля) или дипольными (с нулевым суммарным зарядом, но с постоянным дипольным моментом). Силы неэлектростатического происхождения лежат в основе разделения этих зарядов и производства электретов.[24]

---

[21] [Whi73a, стр. 71-73] и [Whi73b, стр. 90 и 235].
[22] [Jef59].
[23] [Kat06, стр. 15 и 239-246], [BW10] и [WB11].
[24] [Net94], [Sil10b], [Sil10a], [Bos11, глава 8, с. 226-248] и [BAC12, глава 19, с. 373-392].

- Неэлектростатические силы требуются не только для производства электретов, но и для поддержания их электризации после их производства. Эти силы необходимы, чтобы предотвратить их разрядку или предотвратить их нейтрализацию.

- и т. д.

Во всех этих случаях нам нужна сила неэлектростатического происхождения, чтобы произвести поляризацию изначально нейтрального тела, причем одна сторона этого тела становится положительной, а другая – отрицательной. Сила неэлектростатического происхождения также необходима для разделения зарядов между двумя телами, изначально нейтральными, причем одно из этих тел становится положительным, а другое – отрицательным. Сила неэлектростатического происхождения требуется также для индуцирования тока вдоль замкнутой резистивной цепи.

14.7 Происхождение неэлектростатических сил

Мы считаем, что происхождение неэлектростатических сил, упомянутых в разделах с 14.2 по 14.6, до конца еще не понято. Эти силы должны существовать, чтобы вызвать упомянутые явления. С другой стороны, по нашему мнению, многие аспекты, связанные с этими силами, еще не выяснены во многих ситуациях: их происхождение, их математические выражения, их свойства, и величины, от которых они зависят. Отсутствие полного понимания имеет место даже для самого древнего явлении электростатики, а именно, янтарного эффекта. Пока не совсем ясно, что вызывает разделение зарядов, когда два тела трутся друг против друга. Аналогично, механизм, ответственный за разделение зарядов в отсутствие трения, как при контактной электризации двух разных материалов, не получил до сих пор полного объяснения. Возможно, механизм электризации (через контакт или трение) различных металлов (например, меди и цинка), может отличаться от механизма взаимной электризации проводника и изолятора (например, меди и пластика) или от механизма, имеющего место при взаимной электризации двух изоляторов (например, пластика и резины).

Однако в некоторых случаях мы хорошо знаем происхождение и свойства этих неэлектростатических сил. Мы приведем здесь несколько примеров:

- Когда открытый проводник, как металлическая полоса, движется относительно постоянного магнита, проводник может стать поляризованным (положительным на одном конце и отрицательным на другом). Тот же эффект может также произойти, когда разомкнутый проводник движется относительно замкнутой цепи, несущей постоянный ток.

- Когда замкнутый проводник, как кольцо, движется относительно постоянного магнита, в кольце возникает электрический ток. Тот же

эффект может также произойти, когда кольцо движется относительно другой замкнутой цепи, несущей постоянный ток.

- Предположим теперь, открытый проводник, как металлический стержень, покоится относительно близлежащего замкнутого контура. Когда в цепи протекает переменный ток, проводник может стать поляризованным.

- Пусть теперь замкнутый проводник, как кольцо, находится в состоянии покоя относительно близлежащего замкнутого контура. Когда в цепи протекает переменный ток, в кольце может возникнуть ток.

Существуют более общие ситуации, для которых у нас есть математические выражения, описывающие неэлектростатические силы, а именно:

- Сила между двумя магнитами.

- Сила между двумя проводниками, несущими постоянные токи.

- Сила между магнитом и проводником, несущим постоянный ток.

- Сила между магнитом и наэлектризованной частицей, которая движется относительно магнита.

- Сила между замкнутым контуром, несущим постоянный ток, и наэлектризованной частицей, которая находится в движении относительно цепи.

- Сила между замкнутой цепью, несущей ток, изменяющийся во времени, и наэлектризованной частицей, которая неподвижна или находится в движении относительно цепи.

- Сила между двумя наэлектризованными частицами, движущимися относительно друг друга.

В этих конкретных ситуациях существуют две основные электромагнитные теории, дающие силы, действующие между наэлектризованными частицами. Эти силы могут, например, поляризовать изначально нейтральный проводник, изолированный от земли. Эти силы могут также вызвать ток в резистивном металлическом кольце. Эти две теории описывают силы между наэлектризованными частицами не только когда они находятся в покое, но также когда они движутся относительно друг друга. Это движение может быть относительной скоростью или относительным ускорением между этими частицами.

В следующих подразделах кратко представлены эти две конкурирующие теории.

14.7.1 Теория Фарадея и Максвелла, основанная на электромагнитных полях

Электромагнитная теория, излагаемая в большинстве учебников, была разработана многими авторами, включая Майкла Фарадея, Джеймса Клерка Максвелла и Хендрика Антуана Лоренца (1853-1928).[25] Эта теория предполагает, что движущаяся заряженная частица, называемая источником заряда, генерирует электрическое поле и магнитное поле вокруг него. Эти поля распространяются в пространстве, обычно со скоростью света. Когда они достигают другой движущейся заряженной частицы, называемой пробным зарядом, эти поля будут оказывать электрическую силу и магнитную силу на этот пробный заряд. Одна из больших проблем этой теории – понять смысл этих электромагнитных полей. Обычно эта тема не обсуждается в учебниках.

Фарадей, Максвелл и большинство учебников дают несколько определений понятия поля. Иногда говорят, что поле – это область пространства вокруг источника заряда. В других ситуациях они утверждают, что это поле распространяется в пространстве. Иногда они определяют поле как векторную величину, которая имеет величину и направление. В некоторых контекстах они упоминают, что эти поля несут линейный импульс и энергию. Они также представляют много других различных определений и свойств концепции поля.

Проблема состоит в том, что эти определения противоречат друг другу.[26] Например, как может область пространства распространяться в пространстве? Как область пространства может иметь величину и направление? Гравитационное поле, электрическое поле и магнитное поле имеют различные размерности. Поэтому эти три величины не могут иметь одно и то же имя, «поле», поскольку они являются величинами различной природы. Каждое из этих трех величин должно быть классифицировано в отдельную категорию, получая отдельное имя в соответствии с категорией, к которой оно относится. Есть много других противоречий между этими различными определениями понятия поля, которые мы не будем здесь обсуждать.

Получение математического выражения для силы, оказываемой электрическим и магнитным полями на пробный заряд, в основном связано с работами Максвелла и Лоренца. Это выражение для силы также проблематично. В частности, в формуле для магнитной силы присутствует скорость пробного заряда. Однако физическое толкование этой скорости меняется от автора к автору. Максвелл, Дж. Дж. Томсон (1856-1940), О. Хевисайд (1850-1925), Лоренц, А. Эйнштейн (1879-1955) и др. толкуют эту скорость по разному. Поэтому возникает путаница. Скорость $\vec{v}$, которая присутствует в выражении для магнитной силы, является скоростью тестового заряда относительно чего? Обычно в учебниках этот вопрос не обсуждается. Отсутствие обсуждения этого важного вопроса кажется абсурдным. В конце концов, мы можем применять эту силу только тогда, когда понимаем систему

[25] [Far52], [Max54b] и [Lor95] .

[26] Как обсуждалось в Разделе 2.9 [Ass13] и в Разделах 3.1 и 3.2 [Ass14].

отсчета, относительно которой эта скорость должна измеряться. Некоторые авторы говорят, что скорость надо измерять относительно магнитного поля. Другие авторы считают, что ее следует понимать относительно инерциальной системы отсчета. Некоторые авторы утверждают, что это относительно среды, в которой движется пробный заряд. В других ситуациях нам говорят, что это относительно детектора магнитного поля. Некоторые авторы упоминают, что это относительно источника магнитного поля (например, магнит или провод с током) и т. д. Смысл и происхождение магнитной силы, действующей на пробный заряд, мы обсуждали в другой книге и не будем вдаваться в подробности здесь.[27]

14.7.2 Электродинамика Вебера, основанная на взаимодействии электризованных частиц

Есть другая теория, которая объясняет эти явления, не прибегая к понятию электрических и магнитных полей. Она основана на прямом взаимодействии электризованных частиц, т. е. без промежуточного агента для осуществления взаимодействия.

Эта теория основана главным образом на идеях, разработанных Исааком Ньютоном, Рис. 7.12. В своей книге *Principia* 1687 года Ньютон представил свой закон всемирного тяготения.[28] Согласно Ньютону, сила между двумя частицами пропорциональна произведению их масс, изменяется обратно пропорционально квадрату их расстояния, действует вдоль прямой линии, соединяющей частицы, и следует принципу действия и противодействия.

Шарль Огюстен де Кулон, Рис. 2.16, получил аналогичное выражение, описывающее взаимодействие двух электризованных частиц в покое относительно друг друга, как обсуждалось в разделе 14.1. Он также получил аналогичное выражение, описывающее силу между магнитными полюсами. То есть сила, пропорциональная произведению интенсивностей магнитных полюсов, изменяющаяся как обратный квадрат расстояния между ними, действующая по прямой линии, соединяющей их, и следующая принципу действия и противодействия.[29]

Эрстед опубликовал в 1820 году свой знаменитый эксперимент, описывающий отклонение намагниченной иглы, вызванного действием близкорасположенной прямой проволоки, по которой течет постоянный ток, как упомянуто в разделе 3.4. Открытие Эрстеда оказало сильное влияние на Андре-Мари Ампера, Рис. 14.14 .

Между 1820 и 1827 годами Ампер провел много экспериментов и теоретических исследований, впервые продемонстрировавших существование сил и моментов между токоведущими проводами. Более того, чтобы объяснить открытие Эрстеда, он предположил существование микроскопических электрических токов внутри магнитов. Он получил чрезвычайно важное

[27] См. Раздел 14.5 [Ass13] и раздел 15.5 [Ass14].
[28] [New34], [New90], [New08] и [New10].
[29] Раздел 2.5 в [Ass13] и [Ass14].



Рис. 14.14: Андре-Мари Ампер (1775-1836).

выражение, дающее силу между двумя элементами тока. Эта сила действует вдоль прямой линии, соединяющей элементы, пропорциональна произведению интенсивностей тока, изменяется как обратный квадрат расстояния и следует принципу действия и противодействия. Максвелл считал силу Ампера между элементами тока основной формулой электродинамики, то есть ее наиболее важным результатом:[30]

> Экспериментальное исследование, с помощью которого Ампер установил законы механического взаимодействия между электрическими токами, является одним из самых блестящих достижений науки. Все здание, теория и эксперимент, как будто выскочило, полностью завершенное и полностью вооруженное из головы «Ньютона электричества». Оно совершенно по форме и безупречно по точности, и сводится к формуле, из которой можно вывести все явления, и которая навсегда должна остаться основной формулой электродинамики.

К сожалению, формула Ампера для силы, действующей между элементами тока, редко встречается на страницах современных учебников, посвященных электромагнетизму, и она неизвестна большинству ученых. Учебники дают формулу для силы между элементами тока, предложенную Х. Г. Грассманом (1809-1877). Эта формула основана на работах Ж.-Б. Био (1774-1862) и Ф. Савара (1791-1841). Максвелл знал силу Грассмана. Он сравнил силу Грассмана, силу Ампера и два других выражения, предложенных самим Максвеллом. Сравнив эти четыре выражения, Максвелл пришел к следующему выводу:[31]

> 527.] Из этих четырех различных выражений, формула Ампера, несомненно, является лучшим, так как только это выражение делает силы,

[30] [Max54b, статья 528, с. 175].
[31] [Max54b, статья 527, с. 174].

действующие на эти два элемента, не только равными и противоположными, но и направляет по прямой линии, которая соединяет их.

Интегрируя выведенную им силу между двумя элементами тока вокруг двух замкнутых контуров, в сочетании с предположением о микроскопических электрических токах внутри магнитов, а также внутри Земли, Амперу удалось количественно объяснить три вида явлений, а именно: (I) магнетизм (силы и моменты между магнитами вместе с крутящими моментами и силами между магнитом и землей), (II) электродинамика (силы и крутящие моменты между проводниками с током) и (III) электромагнетизм (силы и крутящие моменты между магнитом и проводом с током, вместе с силами и моментами между Землей и проводом с током). В 1826 году он опубликовал свою основную книгу на эту тему, которая была издана на французском, португальском и английском языках.[32]

Работы Ньютона, Кулона и Ампера получили дальнейшее развитие в трудах физика Вильгельма Эдуарда Вебера (1804-1891), Рис. 14.15.

Полное собрание сочинений Вебера было опубликовано в шести томах в период с 1892 по 1894 годы.[33] Он написал восемь основных мемуаров в период с 1846 по 1878 год под общим названием *Elektrodynamische Maassbestimmungen*.[34] Этот заголовок можно перевести как *Электродинамические измерения*, *Определение электродинамических измерений* или *Определения электродинамических измерений*. Восьмой мемуар был опубликован только посмертно в полном собрании его работ. Три из этих восьми основных мемуаров уже переведены на английский язык, а именно: первое, *Определения электродинамической меры: Касательно универсального закона электрического действия*;[35] шестое, *Электродинамические измерения – Шестой мемуар, относящийся специально к принципу сохранения энергии*;[36] и восьмой, *Определения электродинамической меры: особенно в отношении связи фундаментальных законов электричества с законом гравитации*.[37] Сокращенная версия первого мемуара была опубликована в 1848 году,[38], которая также была переведена на английский, *Об измерении электродинамических сил*.[39] В 2010 году мы опубликовали список всех его работ, переведенных на английский язык.[40] На португальский язык переведена только одна его работа совместно с Рудольфом Колраушем (1809-1858), описывающая первое измерение фундаментальной постоянной, появляющейся в силе Вебера.[41] Несколько авторов обсуждали это чрезвычайно важное и

---

[32] [Amp26], [Amp23], [Cha09], [AC11] и [AC15]. Смотрите также [Ass92a], [Ass94], [BA01], [BA15] и [Ass15a].

[33] [Web92b], [Web92a], [Web93], [Web94b], [WW93] и [WW94].

[34] [Web46], [Web52b], [Web52a], [KW57], [Web64], [Web71], [Web78] и [Web94a].

[35] [Web07].

[36] [Web72].

[37] [Web08].

[38] [Web48].

[39] [Web66].

[40] [Ass10c].

[41] [WK56] и [WK08].



Рис. 14.15: Вильгельм Эдуард Вебер (1804-1891).

новаторское измерение Вебера и Кольрауша.[42]

Вебер получил силу между наэлектризованными частицами, зависящую только от расстояния между этими зарядами, от относительной радиальной скорости между ними и от относительного радиального ускорения между ними. Эта сила является центральной, действует по прямой линии, соединяющей эти две частицы, и следует принципу действия и противодействия. Она удовлетворяет трем принципам сохранения, а именно, линейного импульса, момента импульса и энергии. С помощью электродинамики Вебера можно вывести силу Кулона, а также закон К. Ф. Гаусса (1777-1855). С помощью закона Вебера мы можем также вывести силу Ампера между элементами тока, закон магнитного контура и закон индукции Фарадея.

Электродинамика Вебера не обсуждается в современных учебниках. Тем не менее интерес к этой теории в последнее время неуклонно растет. Этот интерес вызван новыми экспериментами и новыми теоретическими резуль-

[42] [Kir57], [Ros57], [Woo68], [Woo81], [Wis81], [Ros81], [Har82], [JM86, Том 1, с. 144-146 и 296-297] и [Hec96].

татами.

Я верю в электродинамику Вебера и считаю ее самой глубокой и важной из когда-либо предложенных формулировок, описывающих взаимодействие между наэлектризованными частицами. Я работаю с этой теорией с того момента, как узнал о ней.[43]

[43] См., например, [Wie60], [Wie67], [Whi73a, стр. 201-206], [Ass89], [Ass90a], [Ass90b], [Ass91b], [Ass91a], [Ass92a], [Ass92c], [Ass92b], [AC93], [Ass94], [GA94], [Ass95a], [Ass95c], [Ass95b], [AB95], [AB96], [GV99], [BA01], [ARW02], [Fuk03], [AW03], [ARW04], [AH07], [AH09], [AWW11], [AH13], [AWW14], [BA15] и [Ass15a] вместе со ссылками, приведенными в этих работах.

Литература

[AB95] A. K. T. Assis and M. Bueno. Longitudinal forces in Weber's electrodynamics. *International Journal of Modern Physics B*, 9:3689–3696, 1995.

[AB96] A. K. T. Assis and M. A. Bueno. Equivalence between Ampère and Grassmann's forces. *IEEE Transactions on Magnetics*, 32:431–436, 1996.

[AC93] A. K. T. Assis and R. A. Clemente. The influence of temperature on gravitation. *Il Nuovo Cimento B*, 108:713–716, 1993.

[AC11] A. K. T. Assis and J. P. M. d. C. Chaib. *Eletrodinâmica de Ampère: Análise do Significado e da Evolução da Força de Ampère, Juntamente com a Tradução Comentada de Sua Principal Obra sobre Eletrodinâmica*. Editora da Unicamp, Campinas, 2011. ISBN: 9788526809383.

[AC15] A. K. T. Assis and J. P. M. C. Chaib. *Ampère's Electrodynamics — Analysis of the Meaning and Evolution of Ampère's Force between Current Elements, together with a Complete Translation of His Masterpiece: Theory of Electrodynamic Phenomena, Uniquely Deduced from Experience*. Apeiron, Montreal, 2015. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ach96] M. Achilles. *Historische Versuche der Physik nachgebaut und kommentiert*. Wötzel, Frankfurt, 2nd edition, 1996.

[AH07] A. K. T. Assis and J. A. Hernandes. *The Electric Force of a Current: Weber and the Surface Charges of Resistive Conductors Carrying Steady Currents*. Apeiron, Montreal, 2007. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis.

[AH09] A. K. T. Assis and J. A. Hernandes. *A Força Elétrica de uma Corrente: Weber e as Cargas Superficiais de Condutores Resistivos com Correntes Constantes*, volume 73 of *Coleção Acadêmica*. Edusp and Edufal, São Paulo and Maceió, 2009. ISBNs: 9788531411236 and 9788571774315.

[AH13] A. K. T. Assis and J. A. Hernandes. *Elektrischer Strom und Oberflächenladungen: was Wilhelm Weber schon vor mehr als 150 Jahre wußte*. Apeiron, Montreal, 2013. German translation by H. Härtel. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Amp22a] A.-M. Ampère. Expériences relatives à de nouveaux phénomènes électro-dynamiques. *Annales de Chimie et de Physique*, 20:60–74, 1822.

[Amp22b] A.-M. Ampère. Expériences relatives aux nouveaux phénomènes électro-dynamiques que j'ai obtenus au mois de décembre 1821. In A.-M. Ampère, editor, *Recueil d'Observations Électro-dynamiques*, pages 237–250. Crochard, Paris, 1822. Despite this date, the volume of the Recueil was only published in 1823.

[Amp22c] A.-M. Ampère. Exposé sommaire des nouvelles Expériences électro-magnétiques faites par différens Physiciens, depuis le mois de mars 1821, lu dans la séance publique de l'Académie royale des Sciences, le 8 avril 1822. In A.-M. Ampère, editor, *Recueil d'Observations Électro-dynamiques*, pages 199–206. Crochard, Paris, 1822. Despite this date, the volume of the Recueil was only published in 1823.

[Amp23] A.-M. Ampère. Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électro-dynamiques uniquement déduite de l'expérience, dans lequel se trouvent réunis les Mémoires que M. Ampère a communiqués à l'Académie royale des Sciences, dans les séances des 4 et 26 décembre 1820, 10 juin 1822, 22 décembre 1823, 12 septembre et 21 novembre 1825. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, 6:175–387, 1823. Despite this date, the work was only published in 1827.

[Amp26] A.-M. Ampère. *Théorie des Phénomènes Électro-dynamiques, Uniquement Déduite de l'Expérience.* Méquignon-Marvis, Paris, 1826.

[Amp85a] A.-M. Ampère. Expériences relatives aux nouveaux phénomènes électro-dynamiques obtenus au mois de décembre 1821. In J. Joubert, editor, *Collection de Mémoires relatifs a la Physique,* Vol. II: *Mémoires sur l'Électrodynamique*, pages 192–204. Gauthier-Villars, Paris, 1885.

[Amp85b] A.-M. Ampère. Exposé sommaire des nouvelles expériences électromagnétiques faites par différens physiciens, depuis le mois de mars 1821, lu dans la séance publique de l'Académie royale des Sciences, le 8 avril 1822. In J. Joubert, editor, *Collection de Mémoires relatifs a la Physique,* Vol. II: *Mémoires sur l'Électrodynamique*, pages 238–244. Gauthier-Villars, Paris, 1885.

[APZ06] M. S. Amin, T. F. Peterson Jr., and M. Zahn. Advanced Faraday cage measurements of charge and open-circuit voltage using water dielectrics. *Journal of Electrostatics*, 64:424–340, 2006.

[ARW02] A. K. T. Assis, K. Reich, and K. H. Wiederkehr. Gauss and Weber's creation of the absolute system of units in physics. *21st Century Science & Technology*, Vol. 15, No. 3:40–48, 2002.

[ARW04] A. K. T. Assis, K. Reich, and K. H. Wiederkehr. On the electromagnetic and electrostatic units of current and the meaning of the absolute system of units — For the 200th anniversary of Wilhelm Weber's birth. *Sudhoffs Archiv*, 88:10–31, 2004.

[Ass89] A. K. T. Assis. On Mach's principle. *Foundations of Physics Letters*, 2:301–318, 1989.

[Ass90a] A. K. T. Assis. Deriving Ampère's law from Weber's law. *Hadronic Journal*, 13:441–451, 1990.

[Ass90b] A. K. T. Assis. Modern experiments related to Weber's electrodynamics. In U. Bartocci and J. P. Wesley, editors, *Proceedings of the Conference on Foundations of Mathematics and Physics*, pages 8–22, Blumberg, Germany, 1990. Benjamin Wesley Publisher.

[Ass91a] A. K. T. Assis. Can a steady current generate an electric field? *Physics Essays*, 4:109–114, 1991.

[Ass91b] A. K. T. Assis. Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) — Sua vida e sua obra. *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência*, 5:53–59, 1991.

[Ass92a] A. K. T. Assis. *Curso de Eletrodinâmica de Weber*. Setor de Publicações do Instituto de Física da Universidade Estadual de Campinas — UNICAMP, Campinas, 1992. Notas de Física IFGW Número 5. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis and www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?down=60362.

[Ass92b] A. K. T. Assis. On forces that depend on the acceleration of the test body. *Physics Essays*, 5:328–330, 1992.

[Ass92c] A. K. T. Assis. On the mechanism of railguns. *Galilean Electrodynamics*, 3:93–95, 1992.

[Ass94] A. K. T. Assis. *Weber's Electrodynamics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1994. ISBN: 0792331370.

[Ass95a] A. K. T. Assis. Acceleration dependent forces: reply to Smulsky. *Apeiron*, 2:25, 1995.

[Ass95b] A. K. T. Assis. A eletrodinâmica de Weber e seus desenvolvimentos recentes. *Ciência e Natura*, 17:7–16, 1995.

[Ass95c] A. K. T. Assis. Weber's force versus Lorentz's force. *Physics Essays*, 8:335–341, 1995.

[Ass10a] A. K. T. Assis. *The Experimental and Historical Foundations of Electricity*. Apeiron, Montreal, 2010. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass10b] A. K. T. Assis. *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade*. Apeiron, Montreal, 2010. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass10c] A. K. T. Assis. Wilhelm Weber's works translated into English. *21st Century Science & Technology*, Vol. 22, No. 4:67–69, 2010.

[Ass11] A. K. T. Assis. *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade*. Editora Livraria da Física, São Paulo, 2011. ISBN: 9788578610975.

[Ass13] A. K. T. Assis. *Mecânica Relacional e Implementação do Princípio de Mach com a Força de Weber Gravitacional*. Apeiron, Montreal, 2013. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass14] A. K. T. Assis. *Relational Mechanics and Implementation of Mach's Principle with Weber's Gravitational Force*. Apeiron, Montreal, 2014. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass15a] A. K. T. Assis. *Eletrodinâmica de Weber: Teoria, Aplicações e Exercícios*. Editora da Unicamp, Campinas, 2nd edition, 2015. e-ISBN: 978-85-268-1240-6.

[Ass15b] A. K. T. Assis. *The Experimental and Historical Foundations of Electricity*. Apeiron, Montreal, 2015. Book in Russian translated from the English version by A. Baraov. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass17] A. K. T. Assis. *I Fondamenti Sperimentali e Storici dell'Elettricità*. Associazione per l'Insegnamento della Fisica, Parma, 2017. La Fisica nella Scuola, Anno L, n. 2 Supplemento, Quaderno 26. Translated by P. Cerreta, A. Cerreta and R. Cerreta. Edited by P. Cerreta, R. Serafini and R. Urigu. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass18a] A. K. T. Assis. *The Experimental and Historical Foundations of Electricity*, volume 2. Apeiron, Montreal, 2018. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass18b] A. K. T. Assis. *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade*, volume 2. Apeiron, Montreal, 2018. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis.

[AW03] A. K. T. Assis and K. H. Wiederkehr. Weber quoting Maxwell. *Mitteilungen der Gauss-Gesellschaft*, 40:53–74, 2003.

[AWW11] A. K. T. Assis, K. H. Wiederkehr, and G. Wolfschmidt. *Weber's Planetary Model of the Atom*, volume 19 of *Nuncius Hamburgensis — Beiträge zur Geschichte der Naturwissenschaften*. Tredition Science, Hamburg, 2011. Edited by G. Wolfschmidt. ISBN: 9783842402416.

[AWW14] A. K. T. Assis, K. H. Wiederkehr, and G. Wolfschmidt. *O Modelo Planetário de Weber para o Átomo*. Apeiron, Montreal, 2014. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis.

[BA01] M. d. A. Bueno and A. K. T. Assis. *Inductance and Force Calculations in Electrical Circuits*. Nova Science Publishers, Huntington, New York, 2001. ISBN: 1560729171.

[BA15] M. Bueno and A. K. T. Assis. *Cálculo de Indutância e de Força em Circuitos Elétricos*. Apeiron, Montreal, 2nd edition, 2015. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis.

[BAC12] S. L. B. Boss, A. K. T. Assis, and J. J. Caluzi. *Stephen Gray e a Descoberta dos Condutores e Isolantes: Tradução Comentada de Seus Artigos sobre Eletricidade e Reprodução de Seus Principais Experimentos*. Editora Cultura Acadêmica da Unesp, São Paulo, 2012. Available at: www.culturaacademica.com.br/catalogo/stephen-gray-e-a-descoberta-dos-condutores-e-isolantes/.

[Bai01] A. G. Bailey. The charging of insulator surfaces. *Journal of Electrostatics*, 51-52:82–90, 2001.

[BC07] S. L. B. Boss and J. J. Caluzi. Os conceitos de eletricidade vítrea e eletricidade resinosa segundo Du Fay. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29:635–644, 2007.

[Bea96] W. Beaty. Sticky electrostatics. Available at www.amasci.com/emotor/sticky.html, 1996.

[Beu92] G. Beuermann. "Sie schwänzen aber jetzt schon, bis es blitzt und donnert" - Physik - Lichtenbergs Leidenschaft. *Physikalische Blätter*, 48:440–444, 1992.

[BGP16] T. A. L. Burgo, F. Galembeck, and G. H. Pollack. Where is water in the triboelectric series? *Journal of Electrostatics*, 80:30–33, 2016. Doi: 10.1016/j.elstat.2016.01.002.

[BJ92] P. Brix and U. Joost. Mit weningen Worten viel sagen - Georg Christoph Lichtenberg zum 250. Geburtstag. *Physikalische Blätter*, 48:437–439, 1992.

[Blo82] C. Blondel. *A.-M. Ampère et la Création de l'Électrodynamique (1820-1827).* Bibliothèque Nationale, Paris, 1982.

[Bos] T. H. S. Bossa *et al.* Estudo da condutividade elétrica de vidros isoladores de linhas de transmissão HVDC dopados. In: Congresso da Academia Trinacional de Ciências, II, 2007, Foz do Iguaçu, PR, Brazil. Electronic Proceedings available at: www.foz.unioeste.br/~lamat/publicvidros/condutivc3n2007.pdf.

[Bos11] S. L. B. Boss. *Tradução comentada de artigos de Stephen Gray (1666-1736) e reprodução de experimentos históricos com materiais acessíveis - subsídios para o ensino do eletricidade.* PhD in Science Education, Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Bauru, SP, Brazil, 2011. Supervisors: J. J. Caluzi and A. K. T. Assis. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis.

[BW10] C. Blondel and B. Wolff. L'électricité de pression de Haüy et l'électricité de frottement font cause commune. Available at www.ampere.cnrs.fr/labo/, 2010.

[BW12a] C. Blondel and B. Wolff. La loi d'Ohm: la délicate genèse d'une loi "simple". Available at: www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique, 2012.

[BW12b] C. Blondel and B. Wolff. Que dit l'article ELECTRICITE de l'Encyclopédie? Available at www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique, 2012.

[BW12c] C. Blondel and B. Wolff. Teinturiers et tubes de verre: Gray et Dufay. Available at www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique, 2012.

[BW12d] C. Blondel and B. Wolff. Un phénomène plus complexe qu'il n'y paraît: l'attraction des corps légers ou d'un filet d'eau. Available at: www.ampere.cnrs.fr/labo/, 2012.

[BW13] C. Blondel and B. Wolff. La proportionnalité de la force électrique aux charges: définition ou loi expérimentale? Available at www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique, 2013.

[CA08] J. Camillo and A. K. T. Assis. Construção de um gerador eletrostático gotejante: chuva elétrica de Kelvin. *A Física na Escola*, 9:29–32, 2008. Video showing the spark produced in this device available at www.ifi.unicamp.br/~assis and www.youtube.com/watch?v=X7WPSQMtiU0.

[Cam06] J. Camillo. Geradores eletrostáticos: esfera de enxofre de Otto von Guericke e chuva elétrica de Kelvin. Undergraduate work developed at the Institute of Physics of the University of Campinas

— UNICAMP, Brazil. Supervisor: A. K. T. Assis. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis and www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2006/JulianoC-Assis_F809_RFcompleto.pdf, 2006.

[Cer14a] P. Cerreta, 2014. Esperimenti di elettrostatica. Available at: www.scienzaviva.it/Esperimenti_elettrostatica_2014.php.

[Cer14b] P. Cerreta. *Il pendolino, il versorium e l'elettroscopio*, pages 53–56. Associazione per l'Insegnamento della Fisica, Perugia, 2014. Supplemento al n. 3/2015 LFnS, Atti del LIII Congresso Nazionale AIF.

[Cer17] P. Cerreta, 2017. Rubbing. Electroscopes and Conductors. Video dall'edizione 2017 di *Science on Stage*, Debrecen, Hungary. Available at: www.scienzaviva.it/video_15.php.

[Cha09] J. P. M. d. C. Chaib. *Análise do Significado e da Evolução do Conceito de Força de Ampère, juntamente com a Tradução Comentada de sua Principal Obra sobre Eletrodinâmica.* PhD thesis, University of Campinas — UNICAMP, Campinas, Brazil, 2009. Supervisor: A. K. T. Assis. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis and www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/262049.

[Chi54] R. A. Chipman. An unpublished letter of Stephen Gray on electrical experiments, 1707-1708. *Isis*, 45:33–40, 1954.

[Coh66] I. B. Cohen. *Franklin and Newton: An Inquiry into Speculative Newtonian Experimental Science and Franklin's Work in Electricity as an Example Thereof.* Harvard University Press, Cambridge, 1966.

[Coh96] I. B. Cohen. *Benjamin Franklin's Science.* Harvard Univ. Press, Cambridge, 1996.

[Cou85a] C. A. Coulomb. Premier mémoire sur l'électricité et le magnétisme: Construction et usage d'une balance électrique, fondée sur la propriété qu'ont les fils de métal, d'avoir une force de réaction de torsion proportionelle à l'angle de torsion. Détermination expérimentale de la loi suivant laquelle les élémens des corps électrisés du même genre d'électricité, se repoussent mutuellement. *Mémoires de l'Académie royale des Sciences de l'Institut de France*, 88:569–577, 1785. Published in 1788.

[Cou85b] C. A. Coulomb. Second mémoire sur l'électricité et le magnétisme, où l'on détermine, suivant quelles loix de fluide magnétique, ainsi que le fluide électrique, agissent, soit par répulsion, soit par attraction. *Mémoires de l'Académie royale des Sciences de l'Institut de France*, 88:578–611, 1785. Published in 1788.

[Cou35] A. Coulomb. First memoir on electricity and magnetism. In W. F. Magie, editor, *A Source Book in Physics*, pages 408–413, New York, 1935. McGraw-Hill. Original publication in French in 1785.

[CS02] R. W. Chabay and B. A. Sherwood. *Matter & Interactions*, volume 2: Electric and Magnetic Interactions. Wiley, New York, 2002.

[Des76] A. P. Deschanel. *Elementary Treatise on Natural Philosophy.* D. Appleton and Co., New York, 1876. Translated by J. D. Everett.

[DF] C. F. d. C. Du Fay. A letter from Mons. Du Fay, F. R. S. and of the Royal Academy of Sciences at Paris, to His Grace Charles Duke of Richmond and Lenox, concerning electricity. Translated from the French by T. S. M D. *Philosophical Transactions*, 38:258–266, 1733–4.

[DF33a] C. F. d. C. Du Fay. Premier mémoire sur l'électricité. Histoire de l'électricité. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pages 23–35, 1733.

[DF33b] C. F. d. C. Du Fay. Quatriéme mémoire sur l'électricité. De l'attraction et répulsion des corps électriques. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pages 457–476, 1733.

[DF33c] C. F. d. C. Du Fay. Second mémoire sur l'électricité. Quels sont les corps qui sont susceptibles d'électricité. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pages 73–84, 1733.

[DF34] C. F. d. C. Du Fay. Cinquiéme mémoire sur l'électricité. Oú l'on rend compte des nouvelles découvertes sur cette matiére, faites depuis peu par M. Gray; et où l'on examine quelles sont les circonstances qui peuvent apporter quelque changement à l'électricité pour l'augmentation ou la diminution de la force, comme la tempèrature de l'air, le vuide, l'air comprimé, etc. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pages 341–361, 1734.

[Ear42] S. Earnshaw. On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 7:97–114, 1842.

[Egu25] M. Eguchi. On the permanent electret. *Philosophical Magazine*, 49:178–192, 1925.

[Far38] M. Faraday. On induction. *Philosophical Transactions*, 128:1–40, 1838. Reprinted in *Great Books of the Western World*, R. M. Hutchins (editor), (Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952), Vol. 45: Lavoisier, Fourier, Faraday. Pp. 440-467.

[Far43a] M. Faraday. On static electrical inductive action. *Philosophical Magazine*, 22:200–204, 1843. Reprinted in *Great Books of the Western World*, R. M. Hutchins (editor), (Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952), Vol. 45: Lavoisier, Fourier, Faraday. Pp. 848-850.

[Far43b] M. Faraday. On the electricity evolved by the friction of water and steam against other bodies. *Philosophical Transactions*, 133:17–32, 1843. Reprinted in *Great Books of the Western World*, R. M. Hutchins (editor), (Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952), Vol. 45: Lavoisier, Fourier, Faraday. Pp. 584-594.

[Far52] M. Faraday. *Experimental Researches in Electricity*, volume 45, pp. 253-898 of *Great Books of the Western World*. Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952.

[Fera] N. Ferreira. *Mecânica*. Instituto de Física, USP, São Paulo, Brazil. Projeto RIPE — Rede de Instrumentação para o Ensino. Available at www.cienciamao.usp.br/tudo/indice.php?midia=rip.

[Ferb] N. Ferreira. *Eletrostática*, Vol. 1. Instituto de Física, USP, São Paulo, Brazil. Projeto RIPE — Rede de Instrumentação para o Ensino. Available at www.cienciamao.usp.br/tudo/indice.php?midia=rip.

[Ferc] N. Ferreira. *Eletrostática*, Vol. 2. Instituto de Física, USP, São Paulo, Brazil. Projeto RIPE — Rede de Instrumentação para o Ensino. Available at www.cienciamao.usp.br/tudo/indice.php?midia=rip.

[Ferd] N. C. Ferreira. Construa sua própria bússola! Available at: chc.cienciahoje.uol.com.br/construa-sua-propria-bussola.

[Fer78] N. C. Ferreira. Proposta de Laboratório para a Escola Brasileira—Um Ensaio sobre a Instrumentalização no Ensino Médio de Física. Master's thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil, 1978.

[Fer00] G. F. L. Ferreira. Há 50 anos: o efeito Costa Ribeiro. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 22:434–443, 2000.

[Fer01a] N. C. Ferreira. Acende aqui, apaga ali. *Ciência Hoje na Escola*, 12:65–67, 2001.

[Fer01b] N. C. Ferreira. Faça como Gilbert: construa uma bússola de declinação. *Ciência Hoje na Escola*, 12:21–22, 2001.

[Fer01c] N. C. Ferreira. Magnetismo e eletricidade. *Ciência Hoje na Escola*, 12:14–17, 2001.

[Fer01d] N. C. Ferreira. O versorium. *Ciência Hoje na Escola*, 12:18–20, 2001.

[Fer06] N. Ferreira. *Equilíbrio.* Projeto RIPE — Rede de Instrumentação para o Ensino, Instituto de Física, USP, São Paulo, Brazil, 2006. Available at: www.cienciamao.usp.br/tudo/indice.php?midia=rip.

[FLS64] R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands. *The Feynman Lectures on Physics.* Addison-Wesley, Reading, 1964. Volume 2: Mainly Electromagnetism and Matter.

[FM91] N. Ferreira and J.-P. Maury. *Plus et Moins, les Charges Électriques. Qu'est-ce que c'est?* Ophrys, Paris, 1991.

[FR08] N. C. Ferreira and E. M. d. F. Ramos. *Cadernos de Instrumentação para o Ensino de Física: Eletrostática.* Unesp, Rio Claro, 2008. Coleção Ludoteca, Volume 1.

[Fra69] B. Franklin. *Experiments and Observations on Electricity, Made at Philadelphia in America.* David Henry, London, 1769.

[Fra04] B. Franklin. *The Works of Benjamin Franklin.* G. P. Putnam's Sons, 1904. 12 Volumes.

[Fra41] B. Franklin. *Benjamin Franklin's Experiments* — A new edition of Franklin's *Experiments and Observations on Electricity,* I. B. Cohen (ed.). Harvard University Press, Cambridge, 1941.

[Fra81] O. I. Franksen. *H. C. Ørsted — A Man of the Two Cultures.* Strandbergs Forlag, Birkerød, 1981.

[Fre] D. Frerichs and S. Pfeiler, Historische Einführung in die Elektrostatik. Available at: https://www.physikalische-schulexperimente.de/physo/Historische_Einf%C3%BChrung_in_die_Elektrostatik#cite_ref-1.

[Fuk00] E. Fukada. History and recent progress in piezoelectric polymers. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 47:1277–1290, 2000.

[Fuk03] J. Fukai. *A Promenade Along Electrodynamics.* Vales Lake Publishing, Pueblo West, 2003.

[GA94] P. Graneau and A. K. T. Assis. Kirchhoff on the motion of electricity in conductors. *Apeiron*, 19:19–25, 1994.

[Gal14] F. Galembeck *et al.* Friction, tribochemistry and triboelectricity: recent progress and perspectives. *RSC Advances*, 4:64280–64298, 2014. Doi: 10.1039/c4ra09604e.

[Gas91] A. Gaspar. Motor de ímã móvel. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 8:188–193, 1991.

[Gas96] A. Gaspar. *História da Eletricidade.* Ática, São Paulo, 1996.

[Gas00] A. Gaspar. *Eletromagnetismo - Física Moderna.* Ática, São Paulo, 2000.

[Gas03] A. Gaspar. *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental.* Ática, São Paulo, 2003.

[Gas13] A. Gaspar. *Compreendendo a Física*, volume 3: Eletromagnetismo e Física Moderna. Ática, São Paulo, 2013. 2^a edição. Manual do Professor.

[GB17] F. Galembeck and A. L. Burgo. *Chemical Electrostatics.* Springer, Berlin, 2017.

[Gil00] W. Gilbert. *On the Magnet, Magnetick Bodies also, and on the Great Magnet the Earth; a New Physiology, Demonstrated by Many Arguments & Experiments.* Chiswick Press, London, 1900. Translated by S. P. Thompson.

[Gil71a] C. S. Gillmor. *Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering in Eighteenth-Century France.* Princeton University Press, Princeton, 1971.

[Gil71b] C. S. Gillmor. Coulomb, Charles Augustin. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography,* Vol. 3, pages 439–447. Charles Scribner's Sons, New York, 1971.

[Gil78] W. Gilbert. *On the Loadstone and Magnetic Bodies and on the Great Magnet the Earth*, volume 28, pp. 1-121 of *Great Books of the Western World.* Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1978. Translated by P. F. Mottelay.

[Graa] S. Gray. An account of some new electrical experiments. *Philosophical Transactions*, 31:104–107, 1720–1.

[Grab] S. Gray. The electricity of water. *Philosophical Transactions*, 37:227–230 (addenda in page 260), 1731–2.

[Grac] S. Gray. Experiments and observations upon the light that is produced by communicating electrical attraction to animate or inanimate bodies, together with some of its most surprising effects. *Philosophical Transactions*, 39:16–24, 1735–6.

[Grad] S. Gray. Farther account of his experiments concerning electricity. *Philosophical Transactions*, 37:285–291, 1731–2.

[Grae] S. Gray. Farther accounts of his experiments concerning electricity. *Philosophical Transactions*, 37:397–407, 1731–2.

[Graf] S. Gray. Several experiments concerning electricity. *Philosophical Transactions*, 37:18–44, 1731–2.

[Grag] S. Gray. Some experiments relating to electricity. *Philosophical Transactions*, 39:166–170, 1735–6.

[Gre94] T. B. Greenslade Jr. The hydro-electrical machine. *The Physics Teacher*, 32:210–211, 1994.

[Gro54] B. Gross. Theory of thermodielectric effect. *Physical Review*, 94:1545–1551, 1954.

[Gui12] J. Guisasola. Book review: Andre Koch Torres Assis (2010) The Experimental and Historical Foundations of Electricity. *Science & Education*, 21:283–285, 2012. Doi: 10.1007/s11191-010-9318-z.

[GV99] J. Guala-Valverde. *Inercia y Gravitacion*. Fundacion Julio Palacios, Neuquen, Argentina, 1999. In collaboration with J. Tramaglia and R. Rapacioli. Available at: www.educ.ar/sitios/educar/recursos/ver?id=90380.

[Hae12] H. Haertel. Die Natur macht keine Sprünge — auch nicht beim Ohm'schen Gesetz. *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, 5:31–35, 2012.

[Har67] W. S. Harris. *A Treatise on Frictional Electricity, in Theory and Practice*. Virtue and Co., London, 1867. Edited by C. Tomlinson.

[Har82] P. M. Harman. *Energy, Force, and Matter — The Conceptual Development of Nineteenth-Century Physics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1982.

[Hau] F. Hauksbee. An account of the repetition of an experiment touching motion given bodies included in a glass, by the approach of a finger near its outside: With other experiments on the effluvia of glass. *Philosophical Transactions*, 26:82–86, 1708–1709.

[Hea87] O. Heaviside. Electromagnetic induction and its propagation. *The Electrician*, 1885-87. Reprinted in O. Heaviside, Electrical Papers (Macmillan, London, 1892), Vol. 1, Art. 30, pp. 429-560 and O. Heaviside, Electrical Papers (Macmillan, London, 1894), Vol. 2, Art. 35, pp. 39-155.

[Hec96] L. Hecht. The significance of the 1845 Gauss-Weber correspondence. *21st Century Science & Technology*, 9(3):22–34, 1996.

[Hee92] P. Heering. On Coulomb's inverse square law. *American Journal of Physics*, 60:988–994, 1992.

[Hei66] J. L. Heilbron. G. M. Bose: the prime mover in the invention of the Leyden jar? *Isis*, 57:264–267, 1966.

[Hei99] J. L. Heilbron. *Electricity in the 17th and 18th Centuries — A Study in Early Modern Physics.* Dover, New York, 1999.

[Hom81] R. W. Home. *The Effluvial Theory of Electricity.* Arno Press, New York, 1981.

[Jea27] J. Jeans. *The Mathematical Theory of Electricity and Magnetism.* Cambridge University Press, Cambridge, 1927.

[Jec12] B. Jech. Sur l'expérience de Desaguliers de la déviation d'un filet d'eau par une tige électrisée. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 946:737–760, 2012.

[Jef59] O. Jefimenko. Lecture demonstrations on electrification by contact. *American Journal of Physics*, 27:604–605, 1959. Doi: 10.1119/1.1934925.

[Jef71a] O. Jefimenko. Franklin's electric motors. *American Journal of Physics*, 39:1139–1140, 1971.

[Jef71b] O. Jefimenko. Operation of electric motors from the atmospheric electric field. *American Journal of Physics*, 39:776–778, 1971.

[Jef73] O. D. Jefimenko. *Electrostatic Motors: Their History, Types, and Principles of Operation.* Electret Scientific, Star City, 1973.

[JG17] W. T. Jardim and A. Guerra. República das letras, academias e sociedades científicas no século XVIII: a garrafa de Leiden e a ciência no ensino. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 34:774–797, 2017. Doi: 10.5007/2175-7941.2017v34n3p774.

[JM86] C. Jungnickel and R. McCormmach. *Intellectual Mastery of Nature — Theoretical Physics from Ohm to Einstein*, volume 1-2. University of Chicago Press, Chicago, 1986.

[JW71] O. Jefimenko and D. K. Walker. Electrostatic motors. *The Physics Teacher*, 9:121–129, 1971.

[JW80] O. D. Jefimenko and D. Walker. Electrets. *The Physics Teacher*, 18:651–659, 1980.

[Kat06] S. Katzir. *The Beginnings of Piezoelectricity - A Study in Mundane Physics*, volume 246 of *Boston Studies in Philosophy of Science.* Springer, Dordrecht, 2006.

[Kip09] N. Kipnis. A law of physics in the classroom: the case of Ohm's law. *Science & Education*, 18:349–382, 2009. Doi: 10.1007/s11191-008-9142-x.

[Kir49] G. Kirchhoff. Ueber eine Ableitung der Ohm'schen Gesetze, welche sich an die Theorie der Elektrostatik anschliesst. *Annalen der Physik*, 78:506–513, 1849. Reprinted in G. Kirchhoff's *Gesammelte Abhandlungen* (Barth, Leipzig, 1882), pp. 49-55.

[Kir50] G. Kirchhoff. On a deduction of Ohm's law in connexion with the theory of electrostatics. *Philosophical Magazine*, 37:463–468, 1850.

[Kir57] F. Kirchner. Determination of the velocity of light from electromagnetic measurements according to W. Weber and R. Kohlrausch. *American Journal of Physics*, 25:623–629, 1957.

[KW57] R. Kohlrausch and W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere Zurückführung der Stromintensitäts-Messungen auf mechanisches Maass. *Abhandlungen der Königl. Sächs. Gesellschaft der Wissenschaften, mathematisch-physische Klasse*, 5:221–290, 1857. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 609-676.

[LB08] C.-Y. Liu and A. J. Bard. Electrostatic electrochemistry at insulators. *Nature Materials*, 7:505–509, 2008. Doi: 10.1038/nmat2160.

[LB09] C.-Y. Liu and A. J. Bard. Electrons on dielectrics and contact electrification. *Chemical Physics Letters*, 480:145–156, 2009. Doi: 10.1016/j.cplett.2009.08.045.

[Lic56] G. C. Lichtenberg. *Über eine neue Methode, die Natur und die Bewegung der elektrischen Materie zu erforschen*, volume 246 of *Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften*. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1956. Herausgegeben in neuer deutscher Übersetzung von H. Pupke.

[Llo80] J. T. Lloyd. Lord Kelvin demonstrated. *The Physics Teacher*, 18:16–24, 1980.

[Lom17] M. V. Lomonosov, 2017. Discourse on atmospheric phenomena originating from electrical force. English translation and commentary by V. Shiltsev. arXiv:1709.08847 [physics.hist-ph].

[Lor95] H. A. Lorentz. *Versuch einer Theorie der Electrischen und Optischen Erscheinungen in Bewegten Körpern*. E. J. Brill, Leiden, 1895. Abschmitt I (Die Grundgleichungen für ein System in den Aether eingelagerter Ionen), §12 (Der zweite Theil der auf die ponderable Materie wirkenden Kraft), pp. 21-22.

[LSB08] C. E. Laburú, O. H. M. d. Silva, and M. A. Barros. Laboratório caseiro - pára-raios: um experimento simples e de baixo custo para

a eletrostática. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 25:168–182, 2008.

[MA08] C. P. Magnaghi and A. K. T. Assis. Sobre a eletricidade excitada pelo simples contato entre substâncias condutoras de tipos diferentes — Uma tradução comentada do artigo de Volta de 1800 descrevendo sua invenção da pilha elétrica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 25:118–140, 2008.

[Mag06] C. P. Magnaghi. Origem da corrente elétrica — a invenção da pilha. Undergraduate work developed at the Institute of Physics of the University of Campinas — UNICAMP, Brazil. Supervisor: A. K. T. Assis. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis and www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2006/CenoP-Assis_RF1.pdf, 2006.

[Mas87] S. Mascarenhas. Bioelectrets: electrets in biomaterials and biopolymers. In G. M. Sessler, editor, *Electrets*, pages 321–346. Springer, Berlin, 2nd edition, 1987.

[Max54a] J. C. Maxwell. *A Treatise on Electricity and Magnetism*, volume I. Dover, New York, 1954.

[Max54b] J. C. Maxwell. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Dover, New York, 1954.

[MB17] B. A. Moura and T. Bonfim. Benjamin Franklin e a formação de temporais com raios e trovões: tradução comentada de uma carta a John Mitchel. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 34:460–478, 2017. Doi: 10.5007/2175-7941.2017v34n2p460.

[MF] G. d. C. Marques and C. Furukawa. Eletromagnetismo - Tema 2 - O potencial elétrico - Experimento 3: Máquina de indução: eletróforo de Volta. Digital classes of the Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, Brazil. Available at http://eaulas.usp.br/portal/home/video.action?idItem=5874.

[Mil17] R. A. Millikan. *The Electron: Its Isolation and Measurements and the Determination of Some of Its Properties*. The University of Chicago Press, Chicago, 1917. Edited with an introduction by J. W. M. DuMond.

[Mor04a] B. Morse. Pointy tab blunt tab. Electrostatic Video Series. Wright Center for Innovative Science Education. Available at: https://www.youtube.com/watch?v=6pnXOHjYjO0, 2004.

[Mor04b] R. A. Morse, 2004. Benjamin Franklin and Electrostatics. Homepage created and collected by R. A. Morse. Available at: www.compadre.org/psrc/Franklin/.

[MW08] L. S. McCarty and G. M. Whitesides. Electrostatic charging due to separation of ions at interfaces: contact electrification of ionic electrets. *Angewandte Chemie (International Edition)*, 47:2188–2207, 2008. Doi: 10.1002/anie.200701812.

[MWW07] L. S. McCarty, A. Winkleman, and G. M. Whitesides. Ionic electrets: electrostatic charging of surfaces by transferring mobile ions upon contact. *Journal of the American Chemical Society*, 129:4075–4088, 2007. Doi: 10.1021/ja067301e.

[Net] L. F. Netto. Feira de ciências. Available at: www.feiradeciencias.com.br.

[Net94] L. F. Netto. Eletreto (o ímã da eletrostática). Available at: www.feiradeciencias.com.br/sala11/11_T02.asp, 1994.

[New34] I. Newton. *Mathematical Principles of Natural Philosophy.* University of California Press, Berkeley, 1934. Cajori edition.

[New52] I. Newton. *Mathematical Principles of Natural Philosophy*, volume 34, pp. 1-372 of *Great Books of the Western World.* Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952. Translated by A. Motte and revised by F. Cajori.

[New90] I. Newton. *Principia — Princípios Matemáticos de Filosofia Natural.* Nova Stella/Edusp, São Paulo, 1990. Livro I: O Movimento dos Corpos. Portuguese translation by T. Ricci, L. G. Brunet, S. T. Gehring and M. H. C. Célia.

[New99] I. Newton. *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy.* University of California Press, Berkeley, 1999. A new translation by I. B. Cohen and A. Whitman, assisted by J. Budenz.

[New08] I. Newton. *Principia — Princípios Matemáticos de Filosofia Natural.* Edusp, São Paulo, 2008. Livro II: O Movimento dos Corpos (em Meios com Resistência). Livro III: O Sistema do Mundo (Tratado Matematicamente). Portuguese translation by A. K. T. Assis. ISBN: 9788531410895.

[New10] I. Newton. *Principia — Princípios Matemáticos de Filosofia Natural.* Folha de São Paulo, São Paulo, 2010. Livro III: O Sistema do Mundo (Tratado Matematicamente). ISBN: 9788563270306. Coleção Folha de São Paulo: Livros que Mudaram o Mundo, Volume 9. Portuguese translation by A. K. T. Assis.

[Oer20a] H. C. Oersted. Expériences sur l'effet du conflict électrique sur l'aiguille aimantée. *Annales de Chimie et de Physique*, 14:417–425, 1820.

[Oer20b] H. C. Oersted. Experiments on the effect of a current of electricity on the magnetic needle. *Annals of Philosophy*, 16:273–277, 1820. Translated from a printed account drawn up in Latin by the author and transmitted by him to the Editor of the *Annals of Philosophy*.

[Oer65] H. C. Oersted. Experiments on the effect of a current of electricity on the magnetic needle. In R. A. R. Tricker, *Early Electrodynamics – The First Law of Circulation*, pages 113–117, New York, 1965. Pergamon. Translation from Thomson's *Annals of Philosophy*, October 1820. Translated from a printed account drawn up in Latin by the author and transmitted by him to the Editor of the *Annals of Philosophy*.

[OF38] G. S. Ohm and G. T. Fechner. *Das Grundgesetz des elektrischen Stromes*, volume 244 of *Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften*. Akad. Verlagsgesellsch., Leipzig, 1938. Drei Abhandlungen von Georg Simon Ohm (1825 und 1826) und Gustav Theodor Fechner (1829). Herausgegeben von C. Piel.

[Ohm25] G. S. Ohm. Vorläufige Anzeige des Gesetzes, nach welchem Metalle die Kontakt-Elektrizität leiten. *Journal für Chemie und Physik*, 44:10–118, 1825. Reprinted in *Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften*, Nr. 244, C. Piel (ed.), (Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1938), pp. 1-7.

[Ohm26] G. S. Ohm. Bestimmung des Gesetzes, nach welchem Metalle die Kontakt-Elektrizität leiten, nebst einem Entwurfe zu einer Theorie des Voltaschen Apparates und des Schweiggerschen Multiplikators. *Journal für Chemie und Physik*, 46:137–166, 1826. Reprinted in *Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften*, Nr. 244, C. Piel (ed.), (Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1938), pp. 8-29.

[Ohm66] G. S. Ohm. The galvanic circuit investigated mathematically. In R. Taylor, editor, *Scientific Memoirs,* Vol. 2, pages 401–506, New York, 1966. Johnson Reprint Corporation. English translation by W. Francis.

[OP09] K. Ovchinnikova and G. H. Pollack. Can water store charge? *Langmuir*, 25:542–547, 2009. Doi: 10.1021/la802430k.

[Ørs86] H. C. Ørsted. Experiências sobre o efeito do conflito elétrico sobre a agulha magnética. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 10:115–122, 1986. Translated by R. d. A. Martins.

[Per44] E. Perucca. *Física General y Experimental*, volume II: Optica, Electricidad y Magnetismo. Editorial Labor, Barcelona, 1944. Translated from the fourth Italian edition by J. Melis and J. M. V. Llenas.

[Pla52] Plato. *Timaeus.* In *Great Books of the Western World,* R. M. Hutchins, Editor in Chief, Vol. 7, pages 442–477, Chicago, 1952. Encyclopaedia Britannica. Translated by B. Jowett.

[Pla09] Platao. *Timeu e Crítias ou A Atlântida.* Hemus, São Paulo, 2009. Portuguese translation by N. d. P. Lima.

[Pol13] G. H. Pollack. *The Fourth Phase of Water: Beyond Solid, Liquid, and Vapor.* Ebner & Sons, Seattle, 2013.

[Pot84] A. Potier. *Collection de Mémoires relatifs a la Physique*, volume 1: *Mémoires de Coulomb.* Gauthiers-Villars, Paris, 1884.

[Pri75] J. Priestley. *The History and Present State of Electricity, with Original Experiments*, volume II. C. Bathurst and T. Lowndes, London, 3rd edition, 1775.

[Pri66] J. Priestley. *The History and Present State of Electricity*, volume 2. Johnson Reprint Corporation, New York, 1966. The Sources of Science, Number 18. Reprinted from the third edition, London, 1775.

[Rai15] A. C. Raicik. Experimentos exploratórios: os contextos da descoberta e da justificativa nos trabalhos de Gray e Du Fay. Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, Brazil, 2015.

[Ram] C. Ramsauer, Das Ohmsche Gesetz (1826), in C. Ramsauer, *Grundversuche der Physik in historischer Darstellung* (Springer, Berlin, 1953), Vol. 1: Von der Fallgesetzen bis zu den elektrischen Wellen.

[Roc89] J. Roche. Applying the history of electricity in the classroom: a reconstruction of the concept of 'potential'. In M. Shortland and A. Warwick, editors, *Teaching the History of Science*, pages 168–184. Basil Blackwell, Oxford, 1989.

[Ros90] F. Rosenberger. *Die Geschichte der Physik*, volume 3. Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1887-1890.

[Ros57] L. Rosenfeld. The velocity of light and the evolution of electrodynamics. *Il Nuovo Cimento*, Supplement to vol. 4:1630–1669, 1957.

[Ros81] L. Rosenfeld. Kirchhoff, Gustav Robert. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography,* Vol. 7, pages 379–383, New York, 1981. Charles Scribner's Sons.

[RP13a] A. C. Raicik and L. O. Q. Peduzzi, 2013. Uma abordagem histórica e experimental à eletricidade em uma disciplina sobre a evolução dos conceitos da física. Anais do XX Simpósio Nacional de Ensino de Física - SNEF, São Paulo, SP. Págs. 1-8.

[RP13b] A. C. Raicik and L. O. Q. Peduzzi, 2013. Uma discussão sobre os contextos da descoberta e da justificativa nos estudos de Du Fay. Anais do IX Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências - IX ENPEC, Águas de Lindóia, SP, 10 a 14 de novembro. Págs. 1-8.

[RP13c] A. C. Raicik and L. O. Q. Peduzzi, 2013. Uma análise da terminologia *descoberta* e sua contextualização nos livros didáticos: os estudos de Gray e Du Fay. Anais do V Encontro Estadual de Ensino de Física, Porto Alegre, RS. Págs. 1-13.

[RP15a] A. C. Raicik and L. O. Q. Peduzzi. Potencialidades e limitações de um módulo de ensino: uma discussão histórico-filosófica dos estudos de Gray e Du Fay. *Investigações em Ensino de Ciências*, 20:138–160, 2015.

[RP15b] A. C. Raicik and L. O. Q. Peduzzi. Um resgate histórico e filosófico dos estudos de Charles Du Fay. *Revista Ensaio*, 17:105–125, 2015. Doi: 10.1590/1983-211720175170105.

[RP16] A. C. Raicik and L. O. Q. Peduzzi. A estrutura conceitual e epistemológica de uma descoberta científica: reflexões para o ensino de ciências. *Alexandria - Revista de Educação em Ciência e Tecnologia*, 9:149–176, 2016. Doi: 10.5007/1982-5153.2016v9n2p149.

[RR57] D. Roller and D. H. D. Roller. The Development of the Concept of Electric Charge. In J. B. Conant, editor, *Harvard Case Studies in Experimental Science*, chapter 8, pages 541–639. Harvard University Press, Cambridge, 1957.

[San11] L. P. Santos *et al.* Water with excess electric charge. *The Journal of Physical Chemistry C*, 115:11226–11232, 2011. Doi: 10.1021/jp202652q.

[Sav] I. V. Savelyev. *Physics: A General Course*, volume II: Electricity and Magnetism, Waves and Optics. Mir, Moscow. Translated from Russian by G. Leib.

[Sch63] M. Schagrin. Resistance to Ohm's law. *American Journal of Physics*, 31:536–547, 1963.

[Sch07] L. B. Schein. Recent progress and continuing puzzles in electrostatics. *Science*, 316:1572–1573, 2007.

[Sco59] W. T. Scott. Who was Earnshaw? *American Journal of Physics*, 27:418–419, 1959.

[Ses87] G. M. Sessler (ed.). *Electrets.* Springer, Berlin, second edition, 1987.

[SGS31] J. B. Seth, B. Gulati, and S. Singh. On an electromotive force between two metals in relative motion. *Philosophical Magazine*, 12:409–429, 1931. Doi: 10.1080/14786443109461818.

[Sil10a] V. A. Silva Júnior. Fabricação e aplicação de eletretos. Undergraduate work developed at the Institute of Physics of the University of Campinas — UNICAMP, Brazil. Supervisor: A. K. T. Assis. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis and sites.ifi.unicamp.br/lunazzi/files/2014/03/ValterA-Assis_RF1.pdf, 2010.

[Sil10b] V. A. Silva Júnior. História e propriedades dos eletretos. Undergraduate work developed at the Institute of Physics of the University of Campinas — UNICAMP, Brazil. Supervisor: A. K. T. Assis. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis, 2010.

[Sil10c] F. L. d. Silveira. Resenha - Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 27:411–415, 2010. Available at https://www.researchgate.net/publication/315130099.

[Sil11] F. L. d. Silveira. Video in Portuguese on electrostatic experiments. Available at www.if.ufrgs.br/~lang and www.youtube.com/watch?v=GhYKeb99OgA, 2011.

[Sil16] F. L. d. Silveira. Descarga elétrica através do ar NÃO é consequente do arrancamento de elétrons dos eletrodos! Available at www.if.ufrgs.br/cref/?area=questions&id=1652, 2016.

[SP06] C. C. Silva and A. C. Pimentel, 2006. Benjamin Franklin e a história da eletricidade em livros didáticos. Proceedings of the X Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, Londrina, PR, Brazil, 15 to 19/08/2006. Available at: www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epef/x/sys/resumos/T0150-1.pdf.

[SP08] C. C. Silva and A. C. Pimentel. Uma análise da história da eletricidade presente em livros didáticos: o caso de Benjamin Franklin. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 25:141–159, 2008.

[Tho] W. Thomson. On a self-acting apparatus for multiplying and maintaining electric charges, with applications to illustrate the voltaic theory. *Proceedings of the Royal Society of London*, 16:67–72, 1867–1868.

[Tho84a] W. Thomson. Atmospheric electricity. In W. Thomson, editor, *Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism*, pages 192–239. Macmillan, London, 2nd edition, 1884. Article XVI. Reprinted from Nichol's *Cyclopaedia*, 2nd edition, 1860.

[Tho84b] W. Thomson. A mathematical theory of magnetism. In W. Thomson, editor, *Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism*, pages 345–430. Macmillan, London, 2nd edition, 1884. Article XXIV. Reprinted from *Philosophical Transactions*, Vol. 141, pp. 243-268 and 269-285 (1851).

[Tho84c] W. Thomson. Measurement of the electromotive force required to produce a spark in air between parallel metal plates at different distances. In W. Thomson, editor, *Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism*, pages 247–259. Macmillan, London, 2nd edition, 1884. Article XIX. Reprinted from *Proceedings of the Royal Society*, Vol. 10, pp. 326-338 (1860).

[Tho84d] W. Thomson. On the mathematical theory of electricity in equilibrium. In W. Thomson, editor, *Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism*, pages 42–68. Macmillan, London, 2nd edition, 1884. Articles IV (pp. 42-51) and V (pp. 52-68). Reprinted from *Cambridge and Dublin Mathematical Journal*, Vol. 3, pp. 131-148 and 266-274 (1848).

[Tho21] J. J. Thomson. *Elements of the Mathematical Theory of Electricity and Magnetism.* Cambridge University Press, Cambridge, 5th edition, 1921.

[TM09] P. A. Tipler and G. Mosca. *Física para Cientistas e Engenheiros*, volume 2: Eletricidade e Magnetismo, Óptica. LTC, Rio de Janeiro, 6th edition, 2009. Portuguese translation by N. M. Balzaretti.

[TP11] J. D. M. Tamayo and M. G. T. Palacio. *El Papel del Experimento en la Construcción del Conocimiento Físico, el Caso de la Construcción del Potencial Eléctrico como una Magnitude Física. Elementos para Propuestas en la Formación Inicial y Continuada de Profesores de Física.* Universidad de Antioquia - Facultad de Educación, Medellín, 2011. Trabajo de Investigación como requisito parcial para optar al título de Magister en Educación, línea de Educación en Ciencias Experimentales. Director: A. E. R. Chacón.

[Vas05] G. M. S. Vasconcelos. Experimentos de eletrostática de baixo custo para o ensino médio. Undergraduate work developed at the Institute of Physics of the University of Campinas — UNICAMP, Brazil. Supervisor: A. K. T. Assis. Available at www.ifi.unicamp.br/~assis and www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2005/GeraldoM_Assis_RF1.pdf, 2005.

[VF80] R. N. Varney and L. H. Fisher. Electromotive force: Volta's forgotten concept. *American Journal of Physics*, 48:405–408, 1980.

[Vol00a] A. Volta. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. *Philosophical Transactions*, 90:403–431, 1800. Letter in French from A. Volta to J. Banks dated March 20, 1800. It was read before the Royal Society in June 26, 1800.

[Vol00b] A. Volta. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. *Philosophical Magazine*, 7:289–311, 1800.

[Vol64] A. Volta. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. In B. Dibner, *Alessandro Volta and the Electric Battery*, pages 111–131. Franklin Watts, New York, 1964. Translated from the author's paper published in French in the Philosophical Transactions for 1800, Part 2.

[WB09] B. Wolff and C. Blondel. La balance électrique de Coulomb pouvait-elle constituer sa propre cage de Faraday? Available at: www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique, 2009.

[WB11] B. Wolff and C. Blondel. Quelques questions encore posées aujourd'hui par l'histoire de l'électrostatique. *Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, 105:705–717, 2011.

[Web46] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen — Über ein allgemeines Grundgesetz der elektrischen Wirkung. *Abhandlungen bei Begründung der Königl. Sächs. Gesellschaft der Wissenschaften am Tage der zweihundertjährigen Geburtstagfeier Leibnizen's herausgegeben von der Fürstl. Jablonowskischen Gesellschaft (Leipzig)*, pages 211–378, 1846. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 25-214.

[Web48] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen. *Annalen der Physik und Chemie*, 73:193–240, 1848. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 215-254.

[Web52a] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über Diamagnetismus. *Abhandlungen der Königl. Sächs. Gesellschaft der Wissenschaften, mathematisch-physische Klasse*, 1:485–577, 1852. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 473-554.

[Web52b] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere Widerstandsmessungen. *Abhandlungen der Königl. Sächs. Gesellschaft der Wissenschaften, mathematisch-physische Klasse*, 1:199–381, 1852. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 301-471.

[Web64] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über elektrische Schwingungen. *Abhandlungen der Königl. Sächs. Geselschaft der Wissenschaften, mathematisch-physische Klasse*, 6:571–716, 1864. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 4, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1894), pp. 105-241.

[Web71] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über das Princip der Erhaltung der Energie. *Abhandlungen der Königl. Sächs. Gesellschaft der Wissenschaften, mathematisch-physische Klasse (Leipzig)*, 10:1–61, 1871. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 4, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1894), pp. 247-299.

[Web72] W. Weber. Electrodynamic measurements — Sixth memoir, relating specially to the principle of the conservation of energy. *Philosophical Magazine*, 43:1–20 and 119–149, 1872.

[Web78] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über die Energie der Wechselwirkung. *Abhandlungen der Königl. Sächs. Gesellschaft der Wissenschaften, mathematisch-physische Klasse, (Leipzig)*, 11:641–696, 1878. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 4, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1894), pp. 361-412.

[Web92a] W. Weber. *Wilhelm Weber's Werke,* E. Riecke (ed.), volume 2, *Magnetismus*. Springer, Berlin, 1892. Available at http://archive.org/details/wilhelmweberswe01fiscgoog.

[Web92b] W. Weber. *Wilhelm Weber's Werke,* W. Voigt, (ed.), volume 1, *Akustik, Mechanik, Optik und Wärmelehre*. Springer, Berlin, 1892.

[Web93] W. Weber. *Wilhelm Weber's Werke,* H. Weber (ed.), volume 3, *Galvanismus und Elektrodynamik*, first part. Springer, Berlin, 1893. Available at http://archive.org/details/wilhelmweberswe02fiscgoog.

[Web94a] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über den Zusammenhang des elektrischen Grundgesetzes mit dem Gravitationsgesetze. In H. Weber, editor, Wilhelm Weber's *Werke,* Vol. 4, pages 479–525, Berlin, 1894. Springer.

[Web94b] W. Weber. *Wilhelm Weber's Werke,* H. Weber, (ed.), volume 4, *Galvanismus und Elektrodynamik*, second part. Springer, Berlin, 1894.

[Web66] W. Weber. On the measurement of electro-dynamic forces. In R. Taylor, editor, *Scientific Memoirs,* Vol. 5, pages 489–529, New York, 1966. Johnson Reprint Corporation.

[Web07] W. Weber, 2007. Determinations of electrodynamic measure: concerning a universal law of electrical action, 21st Century Science & Technology, posted March 2007, translated by S. P. Johnson, edited by L. Hecht and A. K. T. Assis. Available at http://21sci-tech.com/translation.html and www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Web08] W. Weber, 2008. Determinations of electrodynamic measure: particularly in respect to the connection of the fundamental laws of electricity with the law of gravitation, 21st Century Science & Technology, posted November 2008, translated by G. Gregory, edited by L. Hecht and A. K. T. Assis. Available at http://21sci-tech.com/translation.html and www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Whe43] C. Wheatstone. The bakerian lecture - an account of several new instruments and processes for determining the constants of a voltaic circuit. *Philosophical Transactions*, 133:303–327, 1843.

[Whi73a] E. T. Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*, volume 1: *The Classical Theories.* Humanities Press, New York, 1973.

[Whi73b] E. T. Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*, volume 2: *The Modern Theories.* Humanities Press, New York, 1973.

[Wie60] K. H. Wiederkehr. Wilhelm Webers Stellung in der Entwicklung der Elektrizitätslehre. Dissertation, Hamburg, 1960.

[Wie67] K. H. Wiederkehr. *Wilhelm Eduard Weber — Erforscher der Wellenbewegung und der Elektrizität (1804-1891)*, volume 32 of *Grosse Naturforscher,* H. Degen (ed.). Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 1967.

[Wil12] M. W. Williams. What creates static electricity? *American Scientist*, 100:316–323, 2012. Doi: 10.1511/2012.97.316.

[Wis81] M. N. Wise. German concepts of force, energy, and the electromagnetic ether: 1845–1880. In G. N. Cantor and M. J. S. Hodge, editors, *Conceptions of Ether — Studies in the History of Ether Theories 1740–1900*, pages 269–307, Cambridge, 1981. Cambridge University Press.

[WK56] W. Weber and R. Kohlrausch. Über die Elektricitätsmenge, welche bei galvanischen Strömen durch den Querschnitt der Kette fliesst. *Annalen der Physik und Chemie,* J. C. Poggendoff (ed.), 99:10–25, 1856. Reprinted in Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 597-608.

[WK08] W. Weber and R. Kohlrausch. Sobre a quantidade de eletricidade que flui através da seção reta do circuito em correntes

galvânicas. *Revista Brasileira de História da Ciência*, 1:94–102, 2008. Portuguese translation by A. K. T. Assis.

[Woo68] A. E. Woodruff. The contributions of Hermann von Helmholtz to electrodynamics. *Isis*, 59:300–311, 1968.

[Woo81] A. E. Woodruff. Weber, Wilhelm Eduard. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography,* Vol. 14, pages 203–209, New York, 1981. Charles Scribner's Sons.

[WW93] E. H. Weber and W. Weber. *Wilhelm Weber's Werke,* E. Riecke (ed.), volume 5, *Wellenlehre auf Experimente gegründet oder über die Wellen tropfbarer Flüssigkeiten mit Anwendung auf die Schall- und Lichtwellen.* Springer, Berlin, 1893. Originally published in 1825. Available at http://archive.org/details/wilhelmweberswe00fiscgoog.

[WW94] W. Weber and E. Weber. *Wilhelm Weber's Werke,* F. Merkel and O. Fischer (editors), volume 6, *Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge. Eine anatomisch-physiologische Untersuchung.* Springer, Berlin, 1894. Originally published in 1836. Available at http://archive.org/details/wilhelmweberswe03fiscgoog.

Том 2 книги «**Экспериментальные и исторические основы электричества**» посвящен фундаментальным аспектам физики. В книге описаны основные эксперименты и открытия в истории электричества. Здесь рассмотрены притяжение и отталкивание, положительные и отрицательные заряды, проводники и изоляторы, электризация трением/контактом/ индукцией, трибоэлектрический ряд, электризация клейких лент, равновесие и распределение зарядов в проводниках, электрическое экранирование, мощность точек, искры и электрические разряды в воздухе, электреты и временное сохранение электризации тел. В этой работе описано, как собрать основные инструменты: версориум, электрический маятник, электроскоп, коллектор заряда, тестер цепи, электрофор, лейденская банка, конденсаторы и т. д. Все эксперименты четко описаны и выполнены с использованием простых недорогих материалов. Эти эксперименты приводят к четким понятиям, определениям и законам, описывающим эти явления. Представлены исторические аспекты, а также соответствующие цитаты из фундаментальных работ ученых первопроходцев. Обширная библиография дается в конце книги.

Автор: Андре Коч Торрес Ассис родился в Бразилии (1962) и учился в университете Кампинас - UNICAMP, BS (1983), доктор философии (1987). 1988 академический год он провел в Англии с постдокторской должностью в Culham Laboratory (Oxfordshire, United Kingdom Atomic Energy Authority). Один год он провел в 1991-92 годах в качестве приглашенного ученого в Center for Electromagnetics Research of Northeastern University (Бостон, США). С августа 2001 года по ноябрь 2002 года, а также с февраля по май 2009 года он работал в Institute for the History of Natural Sciences, Hamburg University (Гамбург, Германия) в качестве стипендиата Фонда Александра фон Гумбольдта. С апреля по июнь 2014 года он работал в Technische Universität Dresden (Германия) в качестве стипендиата Фонда Александра фон Гумбольдта. Он является автором многих книг на английском, португальском, итальянском, немецком и русском языках, включая «Электро-динамика Вебера» (1994), «Релятивная механика» (1999), «Расчеты индуктивности и сил в электрических цепях» (с M. A. Bueno, 2001); «Электрическая сила тока: Вебер и поверхностные заряды резистивных проводников, несущих постоянные токи» (с J. A. Hernandes, 2007); «Архимед, центр тяжести и первый закон механики: Закон рычага» (2008 и 2010); «Экспериментальные и исторические основы электричества» (Том 1, 2010); «Планетарная атомная модель Вебера» (с K. H. Wiederkehr и G. Wolfschmidt, 2011); «Стивен Грей и открытие проводников и изоляторов» (с S. L. B. Boss и J. J. Caluzi, 2012); «Иллюстрированный метод Архимеда: использование закона рычага для расчета площадей, объемов и центров тяжести» (с C. P. Magnaghi, 2012); «Релятивная механика и реализация принципа Маха с помощью гравитационной силы Вебера» (2014); и «Электродинамика Ампера - анализ смысла и эволюции силы Ампера между элементами тока» вместе с полным переводом его шедевра: «Теория электродинамических явлений, выведенных однозначно из опыта» (с J.P.M.C. Chaib, 2015). Он был профессором физики в UNICAMP с 1989 года, работая над основами электромагнетизма, гравитации и космологии.

978-1-987980-19-6
9 781987 980196